

Mémoire de stage de fin d'étude

MODELISATION DE LA CONCEPTION DE PIECES PAR UN PROCEDE DE FABRICATION ADDITIVE SLM

SALA ROMERA, Adrià

SAINTIER, Nicolas Tuteur Pédagogique

LEFEUVRE, Anaële Responsable Industriel

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

ANNEE : 2017

N° : BO-M17058

TYPE DE DOCUMENT : Rapport de SFE

CAMPUS DE RATTACHEMENT : Arts et Métiers Bordeaux-Talence

AUTEUR : SALA ROMERA, Adrià

TITRE : MODELISATION DE LA CONCEPTION DE PIECES PAR UN PROCEDE DE FABRICATION ADDITIVE

ENCADREMENT : SAINTIER, Nicolas (Tuteur Pédagogique)/ LEFEUVRE, Anaële (Responsable Industriel)

ENTREPRISE PARTENAIRE : Altran Sud-Ouest

NOMBRE DE PAGES : 58

NOMBRE DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES : 15

RESUME : Ce projet a pour mission la modélisation d'un procédé de fabrication additive par fusion laser d'un lit de poudre métallique connu comme Selective Laser Melting (SLM). Pour ça, l'outil ANSYS© permet de réaliser la simulation éléments finis.

L'objectif principal est de réaliser d'abord une étude thermique pour déterminer le champ de températures pour, ensuite, aborder une étude mécanique afin d'analyser le champ de contraintes résiduelles.

Finalement, des études paramétriques sont réalisés pour trouver le paramétrage machine optimum.

MOTS CLES : fabrication additive (ALM), Selective Laser Melting (SLM), poudre métallique, fusion laser, contraintes résiduelles, thermique, mécanique, éléments finis, ANSYS©

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé chez Altran Sud-Ouest, à Blagnac, sous la direction d'Anaële Lefeuvre et Laure Jaeger, que je remercie pour le soutien, la disponibilité, les conseils et la confiance qu'elles m'ont accordée tout au long de ces travaux.

Mes remerciements iront ensuite aux experts d'Altran qui ont accepté de m'aider avec les problèmes rencontrés pendant le stage. Je remercie ainsi Pauline Dubromez, Michel Ruiz et Grégory Millot pour avoir apporté des informations sans lesquelles les résultats obtenus ne seraient pas ce qu'ils sont aujourd'hui.

Enfin, mes remerciements ne seraient pas complets si je ne citais pas toutes celles et ceux que j'ai eu le plaisir à côtoyer durant ces mois, pour leur sympathie et leur bonne humeur, parmi lesquels Thibaud, Romain, Rayan, Guilaïne, Brice, Adil, Pierrick, Blandine et Baptiste.

TABLE DES MATIERES

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE	1
REMERCIEMENTS	1
TABLE DES MATIERES	2
LISTE DES FIGURES	4
LISTE DES GRAPHIQUES	4
LISTE DES TABLEAUX	5
GLOSSAIRE	5
INTRODUCTION	6
CHAPITRE I Etude Bibliographique	8
I.1. Le procédé de fusion laser sélective (SLM)	8
I.2. Grandeurs physiques à évaluer	8
CHAPITRE II Modélisation numérique du procédé SLM	11
II.1. Modélisation géométrique	11
II.1.1. Modélisation d'une couche	12
II.1.2. Modélisation multi-échelles	13
II.1.3. Modélisation multicouches	14
II.2. Modélisation numérique de la thermique	15
II.2.1. Les propriétés des matériaux	15
II.2.2. Bilan énergétique	16
II.2.3. Chargements	17
II.2.4. Equations de transmission de la chaleur	18
II.3. Modélisation thermomécanique	19
II.3.1. Les propriétés des matériaux	19
II.3.2. Comportement mécanique	19
II.3.3. Chargements et Conditions aux limites	21
II.4. Problématique rencontrée	22
II.4.1. Thermique	22
II.4.2. Thermomécanique	23
II.5. Les limites de l'étude	23
CHAPITRE IV Validation du modèle numérique	24

IV.1. Validation des résultats thermiques	24
IV.2.1. Température accumulée par le système	26
IV.2.2. Vitesses d'échauffement et de refroidissement	27
IV.2.3. Température maximale de chaque couche	29
IV.2.4. Variation du champ de températures avec la profondeur	30
IV.3. Validation des résultats thermomécaniques	32
IV.3.2. Champ de contraintes résiduelles	35
IV.3.3. Variation du champ de contraintes avec la profondeur	37
IV.3.4. Contrainte hydrostatique	38
CHAPITRE V Etude paramétrique du procédé SLM	40
V.1. Préchauffage de la plaque support en acier	40
V.2. Variation de la puissance et de la vitesse laser	42
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	46
BIBLIOGRAPHIE	50
ANNEXES	51
A.1. Propriétés thermiques des matériaux	51
A.2. Propriétés mécaniques des matériaux	52
A.3. Changement d'état des éléments	54
A.4. Shrinkage	56

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Mécanisme de fonctionnement du procédé SLM. (Source: http://www.rapidprototyping.nl)	8
Figure 2 Cycle d'expansion-contraction	10
Figure 3 Couplage entre les physiques existantes	11
Figure 4 Géométrie de l'ensemble	12
Figure 5 Stratégie de balayage d'une couche	12
Figure 6 Stratégie de balayage: Stripes	13
Figure 7 Schéma multi-échelle	13
Figure 8 Empilement couche par couche	14
Figure 9 Bilan thermique (Dai et Shaw 2005)	16
Figure 10 Bilan thermique	17
Figure 11 Modèle de flux laser Gaussien	17
Figure 12 Evolution de la limite d'élasticité avec la loi d'écrouissage isotropique bilinéaire	21
Figure 13 Conditions aux limites mécaniques	21
Figure 14 Champ de températures à des instants différents pour la troisième couche	26
Figure 15 Points sélectionnés pour l'étude des vitesses	27
Figure 16 Path 1-2 utilisé pour les graphiques	31
Figure 17 Nomenclature des contraintes utilisées. Source (Roberts 2012)	32
Figure 18 Champ transitoire des contraintes longitudinales	33
Figure 19 Champ transitoire de contraintes transversales	34
Figure 20 Contraintes résiduelles longitudinales	35
Figure 21 Contraintes résiduelles transversales	36
Figure 22 Contraintes résiduelles normales au plan de fabrication	37
Figure 23 Path 1-2 pour l'évolution de la contrainte avec la profondeur	37
Figure 24 Champ de la contrainte hydrostatique	39
Figure 25 Changement d'état du matériau	56
Figure 26 Shrinkage et calcul de conservation de masse	56

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 ZOOM Evolution de la température entre la première et la deuxième couche	26
Graphique 2 Evolution de la température entre la première et la deuxième couche	26
Graphique 3 Température minimale et maximale au début du traitement de chaque couche	27
Graphique 4 Vitesses d'échauffement et de refroidissement [A] Première Couche; [B] Deuxième Couche; [C] Troisième Couche	28
Graphique 5 Vitesses [A] Echauffement, [B] Refroidissement	29
Graphique 6 Températures maximales [A] Première couche, [B] Deuxième couche, [C] Troisième couche	30

Graphique 7 Evolution de la température en profondeur [A] Première couche, [B] Deuxième couche, [C] Troisième couche	31
Graphique 8 Evolution de la contrainte longitudinale	33
Graphique 9 Evolution de la contrainte transversale	34
Graphique 10 Evolution de la contrainte longitudinale avec la profondeur.....	38
Graphique 11 Contrainte résiduelle de Von Mises pour l'étude paramétrique 1	41
Graphique 12 Contrainte résiduelle maximale à traction pour l'étude paramétrique 1.....	41
Graphique 13 Contrainte transitoire maximale à traction pour l'étude paramétrique 1.....	42
Graphique 14 Contrainte résiduelle de Von Mises pour l'étude paramétrique 2	43
Graphique 15 Contrainte résiduelle maximale à traction pour l'étude paramétrique 2.....	43
Graphique 16 Contrainte transitoire maximale à traction pour l'étude paramétrique 2.....	44
Graphique 17 [A] Conductivité thermique, [B] Densité, [C] Enthalpie du TA6V	51
Graphique 18 Module de Young du TA6V.....	52
Graphique 19 Limite élastique du TA6V.....	52
Graphique 20 Dilatation du TA6V.....	53
Graphique 21 True Stress-True Strain TA6V.....	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Paramètres de fabrication - étude thermique.....	25
Tableau 2 Plan d'expérience Puissance-Vitesse	42
Tableau 3 Résultats critères supplémentaires	45
Tableau 4 Différents instants de l'analyse.....	54

GLOSSAIRE

AM	Additive Manufacturing
DF	Direct Fabrication
DMD	Direct Metal Deposition
LOM	Layer Object Manufacturing
HAZ	Heat Affected Zone
Nd : YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
SLM	Selective Laser Melting

INTRODUCTION

La fabrication additive est une technique de plus en plus utilisée grâce à ses avantages par rapport aux techniques traditionnelles. L'innovation principale est d'obtenir des pièces par extrusion de matière, et non par retrait, comme les procédés standards. En effet, ce nouveau procédé de fabrication permet des gains de masse et de matière significatifs, la réduction du nombre d'opérations de mise en forme, le temps et le coût de fabrication, et la liberté de formes. C'est cette liberté qui permet de créer, à partir des modèles CAO, des géométries complexes, telles que des structures lattices ou formes creuses.

Il existe un grand nombre de technologies de fabrication (Selective Laser Melting, Selective Laser Sintering, Electron Beam Melting ou High Deposition Rate). Ces travaux s'intéressent à la technologie de fusion laser sur lit de poudre métallique. Cette technologie permet d'utiliser différents matériaux avec des propriétés très intéressantes, tels que les alliages de titane, l'inconel, les aciers inoxydables, et les alliages chrome-cobalt. Pour ce projet, le Ti6Al4V est le matériau que nous emploierons, vu qu'il est fortement utilisé dans le secteur de l'aéronautique civile.

Malgré tous ses avantages, ce procédé est très difficile à contrôler en raison d'importants gradients thermiques qui génèrent des déformations plastiques hétérogènes et, de ce fait, des contraintes résiduelles. Ces contraintes résiduelles peuvent nuire à la qualité de la pièce obtenue. En effet, des défauts tels que des porosités peuvent apparaître et entraîner l'apparition de fissures, impactant la robustesse mécanique de la pièce. Aujourd'hui lorsque un défaut est détecté lors de la fabrication, la pièce est envoyée au rebut.

Ainsi, des clients tels qu'Airbus ou Liebherr ont suscité un fort intérêt de contrôler les possibles défauts, afin de garantir les performances des pièces fabriquées. Altran ayant développé un pôle de compétence autour de la fabrication additive a donc proposé le développement d'un modèle numérique s'appuyant sur la méthode des éléments finis. Ces travaux de recherche et de développement s'intègrent au sein du projet SONIA (**S**tructure **O**ptimisation with **f**iNite element modelling **I**n **A**eronautics).

C'est plus particulièrement dans le cadre du work package 2M3D (**M**odelling of the **M**aterial physical behaviour for a **3D** process) que ce projet est réalisé. L'objectif principal sera d'étudier l'apparition et la minimisation des contraintes résiduelles afin d'optimiser et de comprendre les propriétés de la pièce finale en relation avec le paramétrage machine.

A l'aide du logiciel ANSYS®, une étude multidisciplinaire va être réalisée. Une première analyse thermique sera menée puis les résultats de cette étude seront utilisés dans le calcul mécanique pour prédire les champs de contraintes résiduelles.

Une fois le modèle numérique proposé, une étude de validation sera menée. Pour cela, diverses études thermiques et mécaniques seront nécessaires afin de vérifier les résultats obtenus et voir s'ils sont en accord avec la réalité.

Finalement, la minimisation des contraintes résiduelles est liée à la nécessité d'optimiser le paramétrage machine. La réalisation de deux études paramétriques permettra donc de définir les paramètres optimaux qui améliorent les propriétés mécaniques de la pièce finale et, donc, ses performances.

CHAPITRE I Etude Bibliographique

I.1. Le procédé de fusion laser sélective (SLM)

Le principe de fonctionnement du procédé de fusion laser sélective (Selective Laser Melting en anglais) est similaire à celui du prototypage rapide. Tout d'abord, une représentation informatique 3D de la pièce est générée par le biais d'un logiciel CAO (représentation pour couche, fichier .sls). Le but du procédé SLM est d'obtenir des pièces denses (autour de 99.9%) avec des propriétés mécaniques comparables à celles obtenues par des procédés de fabrication standards. Dans ce but, un faisceau laser de forte intensité permet de fondre complètement les particules de poudre métallique.

La poudre, stockée dans une réserve d'alimentation, est répartie uniformément sur le plateau à l'aide d'un rouleau pour former le lit de poudre. Un motif (correspondant à la première tranche de la CAO) est balayé par un laser sur la surface de cette poudre, fusionnant les particules de poudre entre elles et sur le support. Après la solidification de la première couche, le support descend d'une hauteur égale à l'épaisseur d'une couche, puis une nouvelle pellicule de poudre est répartie sur la partie supérieure. Le processus se répète couche après couche pour obtenir la pièce finale (Beaman et al. 1997).

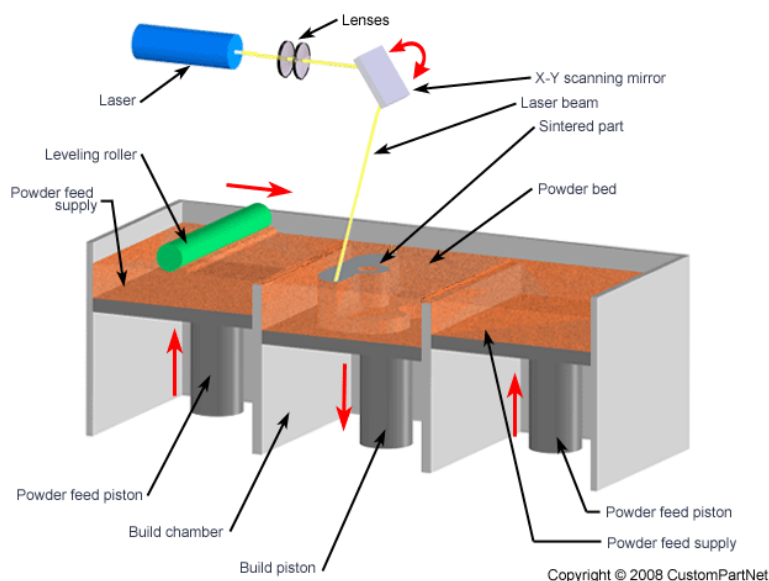


Figure 1 Mécanisme de fonctionnement du procédé SLM. (Source: <http://www.rapidprototyping.nl>)

I.2. Grandeurs physiques à évaluer

Définies par (Totten 2002), les contraintes résiduelles sont les contraintes qui perdurent dans une pièce en l'absence de toutes forces ou moments extérieurs. Elles peuvent être classées selon différentes échelles :

- Type I (σ^I) ou contraintes macroscopiques homogènes : produites à échelle macroscopique (plusieurs grains) entraînant des variations dimensionnelles et des déformations importantes.
- Type II (σ^{II}) ou contraintes microscopiques homogènes : produites lors de la formation de différentes phases allotropiques dans le matériau.
- Type III (σ^{III}) ou contraintes microscopiques hétérogènes : produites lors des dislocations à échelle atomique.

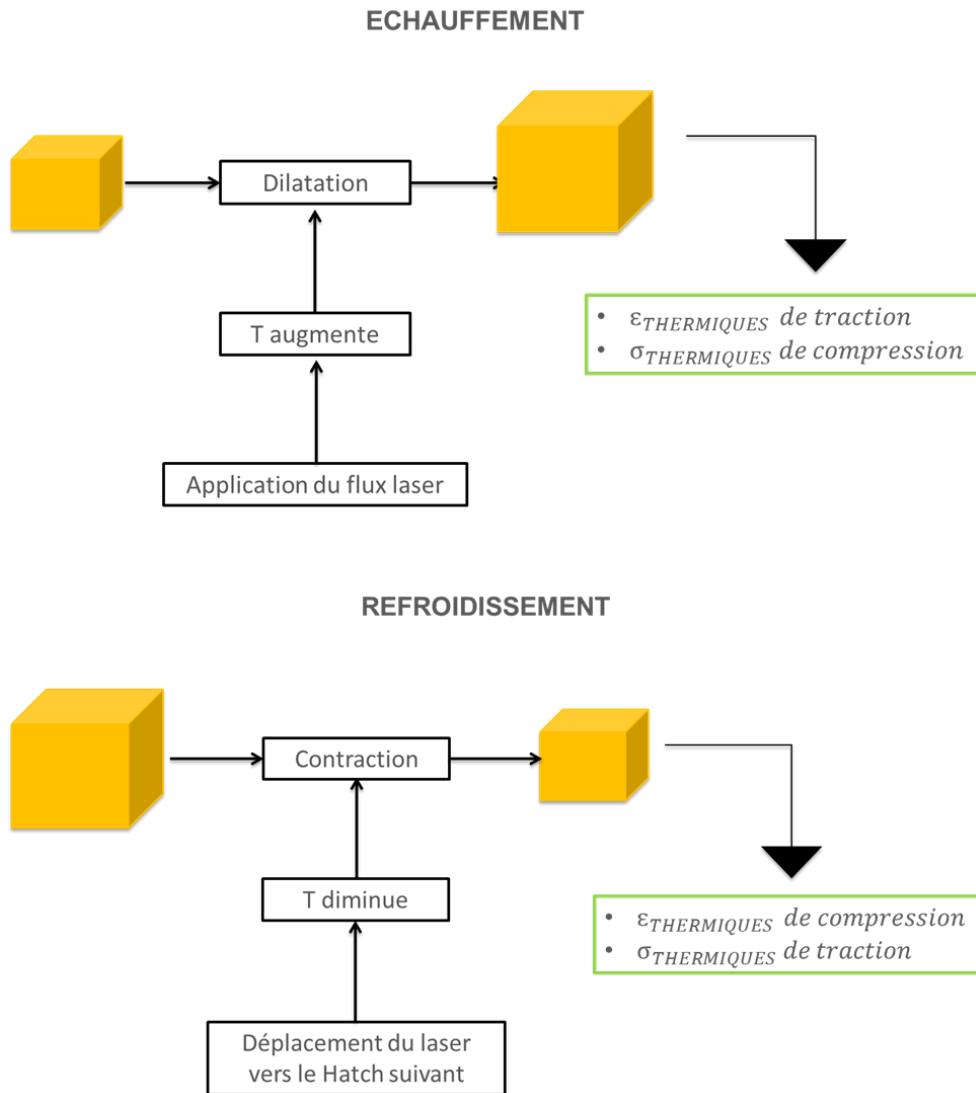
En fusion laser (LOM), l'absorption de l'énergie apportée par le faisceau laser est convertie en chaleur. Ensuite, les contraintes résiduelles proviennent des gradients de température importants dans la pièce dus à l'absorption de cette énergie. C'est pour cette raison qu'en fusion laser, les contraintes résiduelles sont des contraintes dues au chargement thermique.

Ainsi, il est important de déterminer le champ de températures nodales à chaque analyse transitoire (à chaque pointage du laser). C'est ce champ qui est à l'origine des contraintes macroscopiques, et qui induit donc l'état de la matière : état poudre, liquide ou solide, sachant qu'il faut éviter la création de plasma (vaporisation directe de la poudre sans transformation en liquide, comportement non physique).

Le changement de température et d'état de la matière provoque des cycles d'expansion et de contraction provoquant des contraintes résiduelles pouvant dépasser la limite élastique du matériau (σ^I). Ce mécanisme d'apparition de contraintes résiduelles lors du chauffage et du refroidissement est illustré sur la Figure 2. Lors du passage laser, la zone affectée thermiquement se dilate, créant des contraintes de compression dans la zone de dilatation et des contraintes de traction aux alentours. Ensuite, lors du refroidissement, le phénomène est inversé. La contraction de la zone refroidie provoque des contraintes de traction en son sein et des contraintes de compression autour.

La Figure 2 illustre également les déformations élastiques et plastiques provoquées par la fusion laser. Ce champ de déformations est aussi une grandeur physique à évaluer, et la définition du comportement elasto-plastique sera très importante pour le déterminer.

Finalement, il serait très intéressant de connaître les phases allotropiques existantes à chaque instant de temps à partir du champ de températures. Cette étude ne va pas être abordée pendant ce stage. Cela nécessiterait de déterminer les températures et les vitesses de chauffage et de refroidissement afin de déterminer les phases existantes (α , β , transformation martensitique...) à l'aide, par exemple, du logiciel ThermoCalc®. Comme défini précédemment, les contraintes provoquées par le changement des phases allotropiques sont celles de type σ^{II} .



CHAPITRE II Modélisation numérique du procédé SLM

Ce chapitre présente la démarche générale suivie pour modéliser le procédé SLM par éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS®.

Le procédé SLM implique un couplage multi-physique (Papadakis L. et al 2012), comme la thermique, la mécanique et la métallurgie. Pour ce projet, l'étude se focalise sur le couplage Thermique-Mécanique, sachant que des travaux postérieurs aborderont la partie métallurgie plus en détails. La Figure 3 illustre les deux physiques avec ses interactions principales. La température nodale est la grandeur physique à étudier afin de déterminer le comportement thermique, tandis que le comportement mécanique de la pièce sera analysé suivant la contrainte résiduelle.

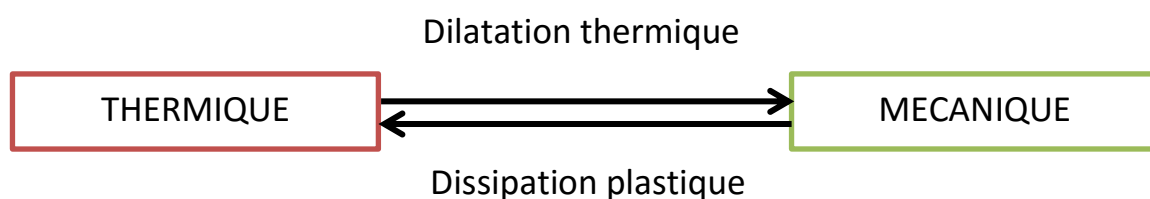


Figure 3 Couplage entre les physiques existantes

Les changements de température provoquent, via la dilatation thermique, des déformations et des contraintes. Inversement, la dissipation plastique génère de la chaleur par les déformations plastiques.

Le logiciel choisi pour notre étude est ANSYS MECHANICAL®, un logiciel qui, pour l'instant, ne permet pas de réaliser une étude multiphysique simultanément. Ainsi, la modélisation du procédé SLM est décomposée en deux études. D'abord, une étude thermique est réalisée, étude qui permet d'obtenir le champ de températures au cours de la fabrication d'une pièce. Ensuite, l'information obtenue lors de l'étude thermique est utilisée pour réaliser l'étude mécanique et, ainsi, déterminer les contraintes résiduelles créées lors de la fabrication d'une pièce. D'autres logiciels, tels que COMSOL, auraient aussi permis de réaliser l'étude, mais le choix d'ANSYS MECHANICAL® permet de maîtriser complètement le phénomène physique multi échelles.

II.1. Modélisation géométrique

Tout d'abord, avant de modéliser les physiques en jeu pendant la fabrication d'une pièce, il est nécessaire de déterminer la géométrie d'étude. Afin de faciliter la compréhension du problème et la modélisation, une éprouvette de faibles dimensions est modélisée. D'autre part, les analyses en jeu engendrent des temps de calculs et nécessitent une capacité de mémoire très importants. Cependant, comme nous le verrons dans la suite de ce rapport, les résultats sont totalement extrapolables à des dimensions réelles.

Même si la modélisation 2D (Shiomi et al. 1999; Matsumoto et al. 2002) aurait facilité le calcul, nous optons pour une modélisation 3D, car le laser a, dans la plupart des cas, une trajectoire complexe qui ne présente pas de plans de symétrie. Le fait de réaliser des simulations planes aurait surestimé les contraintes transverses au plan modélisé, comme démontré par (Patat L. 2010).

Ainsi, les dimensions de la pièce à créer sont de 1 mm par 1 mm , avec une hauteur, pour l'étude thermique, de $90\mu\text{m}$ correspondant à 3 couches de poudre. En revanche, la hauteur pour l'étude mécanique correspond à une seule couche de $30\mu\text{m}$.

Les dimensions de la plaque support sont de 3 mm par 3 mm pour une épaisseur de $0,3\text{ mm}$. La Figure 4 présente la géométrie avec une claire différenciation entre la pièce finale en titane et la plaque support en acier.

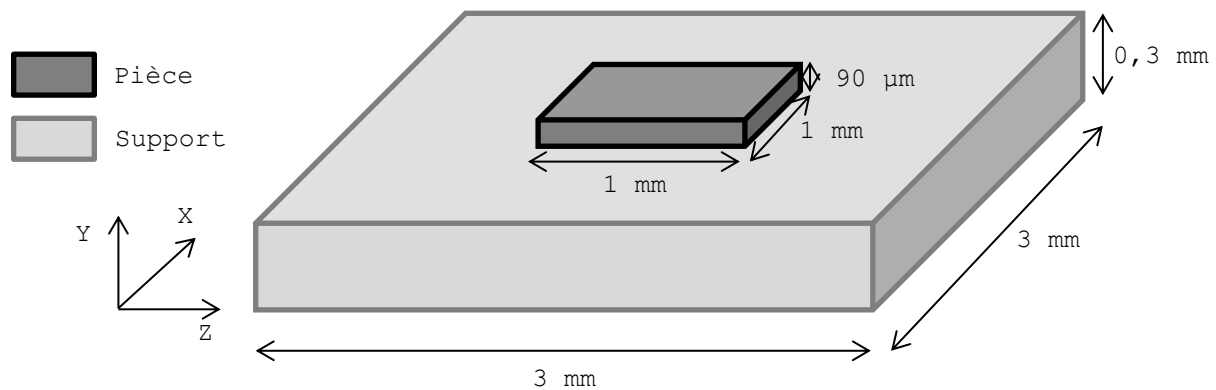


Figure 4 Géométrie de l'ensemble

II.1.1. Modélisation d'une couche

En se focalisant sur la modélisation d'une seule couche, le premier paramètre que nous devons définir est la stratégie de balayage. Pour cela, notre choix s'est orienté vers une stratégie relativement simple basée sur des allers-retours du laser suivant la direction X (illustré sur la Figure 5 en flèches noires). Un premier parcours du laser permet de délimiter le contour de la pièce (couleur orange).

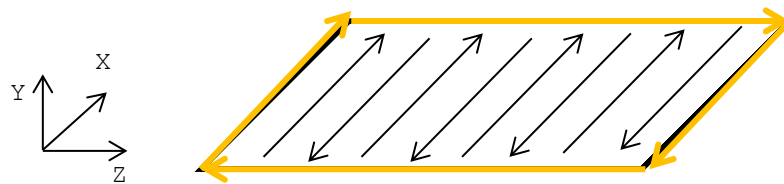


Figure 5 Stratégie de balayage d'une couche

En se focalisant sur cette couche, la stratégie de balayage du laser se divise en 4 *bandes* (dénommées *stripes dans ce rapport*) pour le contour et 8 pour la zone centrale (Figure 6). Un *stripe* pourrait être défini comme le parcours suivi par le laser sans changer de direction.

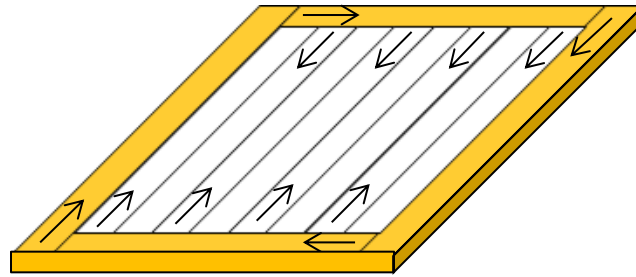


Figure 6 Stratégie de balayage: Stripes

II.1.2. Modélisation multi-échelles

Une fois le parcours laser d'une seule couche défini, l'objectif est maintenant de présenter les différentes échelles existantes lors de la modélisation du procédé.

Partant de l'échelle d'une couche, et comme vu précédemment, le balayage du laser est divisé par *stripes*. Ces *stripes*, de dimensions $0,1\text{mm} \times 1\text{mm}$, sont aussi divisés par *hatches*, qui représentent chacun un pointage laser et qui ont pour dimensions $0,1\text{mm} \times 0,1\text{mm}$.

Finalement, pour arriver à l'échelle d'étude, les *hatches* sont encore divisés en différents éléments de taille $0,025\text{mm}$ de côté, taille équivalente à une particule de poudre métallique (Figure 7).

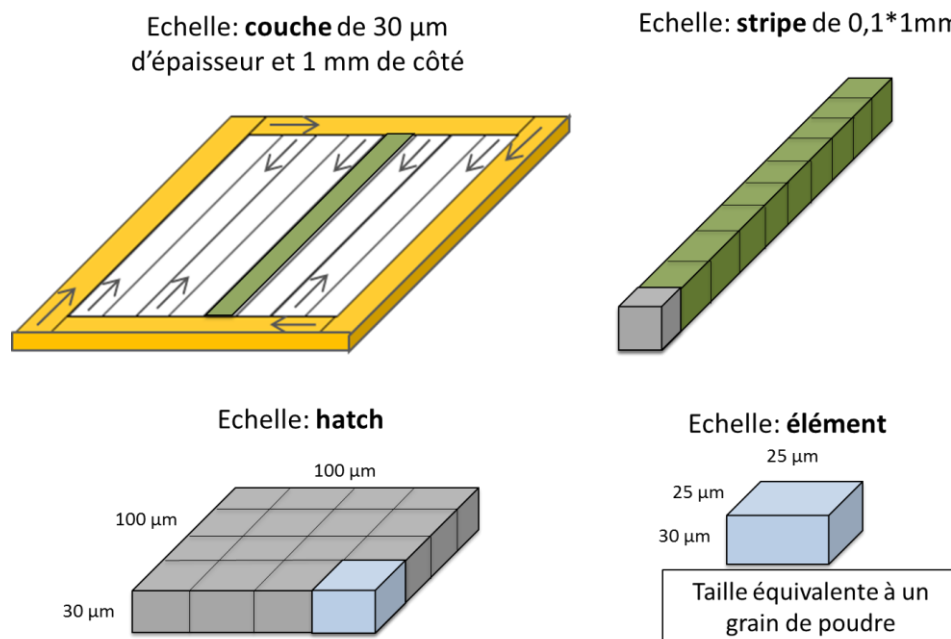


Figure 7 Schéma multi-échelle

C'est à l'échelle des éléments de côté $0,025\text{mm}$ que le changement d'état du matériau est modélisé. Pour cela, le code de calcul développé permet de transformer les éléments de poudre à liquide lorsque tous les nœuds de l'élément ont dépassé la température de fusion du TA6V (autour de 1660°C). Inversement, pour le refroidissement, l'élément est transformé de l'état liquide à l'état solide quand tous ses nœuds ont une température en-dessous de ce point de fusion. Cette démarche est présentée dans les ANNEXES A.3. de ce rapport.

II.1.3. Modélisation multicouches

Dans ce projet, la difficulté provient du fait que le procédé de fabrication est basé sur un principe d'extrusion de matière, c'est-à-dire, la pièce finale est générée par empilement successif de couches. Lors d'une modélisation éléments finis la géométrie globale est créée tout au début, il faut donc éliminer une partie de cette géométrie globale chaque fois qu'une couche est traitée. Pour résoudre ce problème, la méthode *Element Birth and Death* disponible sur ANSYS® a été utilisée. Cette méthode permet de désactiver et activer les éléments selon les besoins. C'est important de noter que la désactivation des éléments ne comporte pas une élimination, sinon que sa matrice de rigidité est multipliée par une valeur très proche de zéro provoquant l'invisibilité de ces éléments pendant la simulation.

Ainsi, les éléments concernant la géométrie finale de la pièce à fabriquer sont désactivés au début de la simulation. Puis, chaque fois que le problème commence le traitement d'une couche, cette couche s'active, sachant que tout ce qui est antérieur à cette couche est déjà actif.

La Figure 8, extraite de la thèse de (Van Belle 2013) présente la modélisation utilisée pour l'empilement de couches. D'abord, les éléments de la région du support [A] sont uniquement activés, pour ensuite activer les éléments de la première couche [B]. Puis, la fabrication de la première épaisseur de la pièce [C] est simulée, une fois terminée et refroidie, les éléments de la deuxième couche sont activés. Et ainsi suite jusqu'à la fin du processus [D]

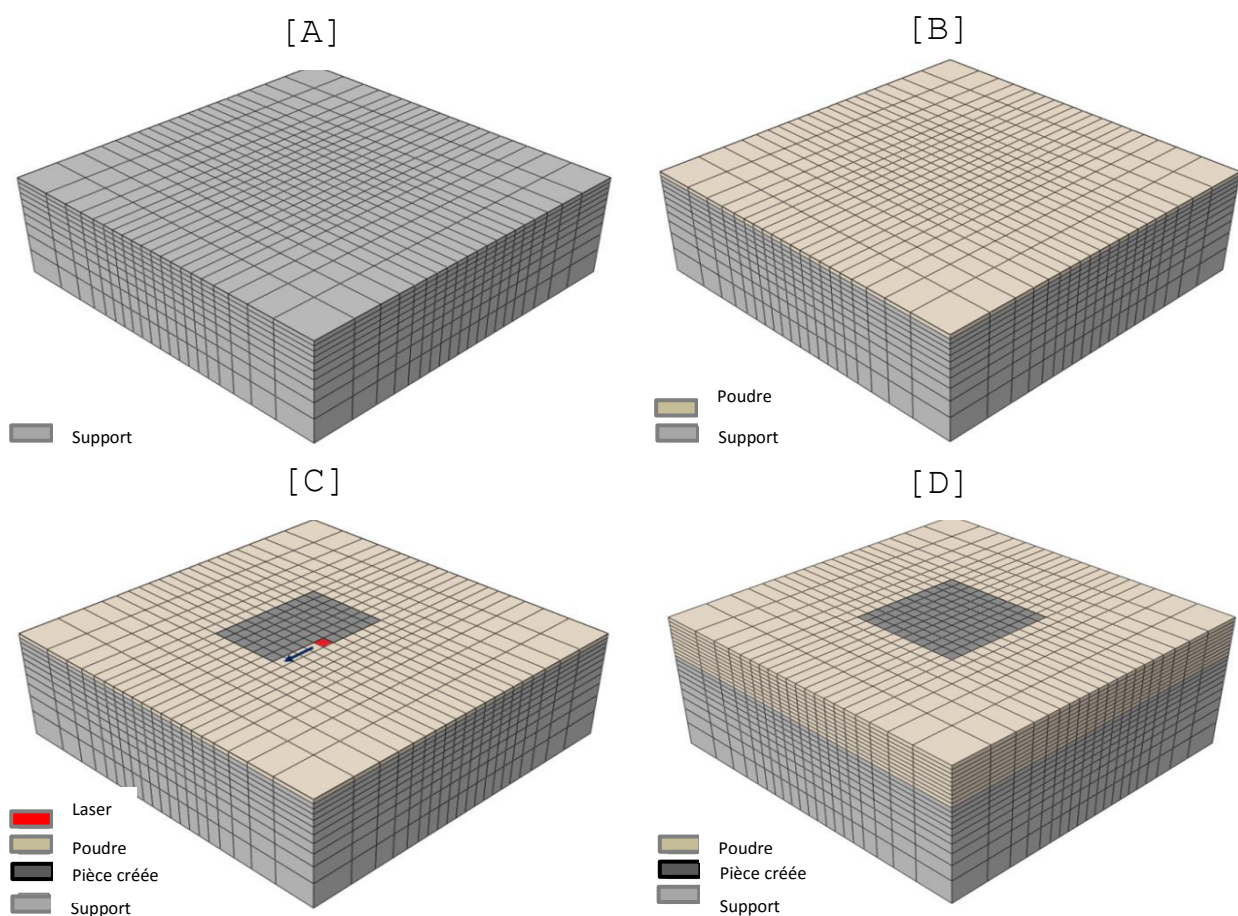


Figure 8 Empilement couche par couche

II.2. Modélisation numérique de la thermique

L'objectif de ce sous-chapitre est de définir les phénomènes physiques liés à la thermique lors du procédé SLM. Dans un premier temps, il est nécessaire de définir les propriétés des matériaux utilisées pour cette partie de l'étude. Dans un second temps, une définition théorique des phénomènes globaux existants est présentée avant de rentrer plus en détails dans la modélisation éléments finis (chargements, conditions limites). Finalement, les problèmes rencontrés liés à la modélisation thermique et les solutions proposées sont présentés.

II.2.1. Les propriétés des matériaux

ANSYS® permet de définir les propriétés des matériaux en fonction de la température. Ce fait est très important pour des modélisations des procédés de fusion laser, où les changements de température provoquent la plupart des contraintes résiduelles.

Le changement d'état des matériaux est en relation avec le changement de ses propriétés thermiques à la température de fusion-solidification. Ainsi, afin de tenir compte de l'ensemble des changements de phase, quatre matériaux différents ont été définis : le Ti6Al4V en poudre, liquide et solide, et l'acier de la plaque support.

Pour chacun de ces matériaux, les propriétés définies, en fonction de la température, sont : la densité [kg/m^3], la conductivité thermique [$W/m \cdot K$] et l'enthalpie [J/m^3 ou J/g].

Les courbes matériaux utilisés pour le Ti6Al4V liquide-solide afin de définir les propriétés sont données en ANNEXES A.1.

Les propriétés de la poudre sont approximées. En effet, la conductivité thermique est très difficile à prédire étant donné qu'elle dépend fortement de la porosité au sein de la poudre. De plus, il faut ajouter le possible rayonnement entre particules et la convection entre une particule et une cavité d'air. En conséquence, c'est un sujet qu'il faudra approfondir dans les prochaines études à échelle microscopique.

Pour calculer la densité, une porosité de 40% a été prise, en accord avec (Roberts 2012). La relation suivante est ensuite employée afin de définir la nouvelle enthalpie de la poudre :

$$\Delta H = \rho_r * \Delta H_s$$

Où ΔH_s est le changement d'enthalpie à l'état solide et ρ_r est le rapport de densité entre la poudre et le solide, de valeur 0,6.

Pour la conductivité thermique, (Roberts 2012) a pris une valeur constante, tandis que les valeurs utilisées pour ce projet sont celles définies expérimentalement par (Romano, Ladani, et Sadowski 2015).

Finalement, l'absorption, définissant le pourcentage d'énergie provenant du laser et absorbé par le corps, a été définie comme une propriété thermique constante suivant l'état physique de la matière.

Ainsi, deux valeurs d'absorption ont été utilisées, soit 0,3 pour la poudre et 0,1 pour l'état liquide, sachant que l'état solide n'est jamais possible pendant l'application du flux laser.

Concernant les conditions limites, la convection naturelle dans l'air donne un coefficient de convection $h = 20 \frac{W}{m^2 K}$, et, pour l'émissivité, la valeur moyenne est égale à 0,75 en accord avec (Van Belle 2013).

II.2.2. Bilan énergétique

Quand le laser irradie la surface du lit de poudre, son énergie est transmise de différentes façons (Figure 9). La transmission de la chaleur peut être divisée en trois types :

- Energie absorbée
- Chaleur dissipée
- Transformation de phase

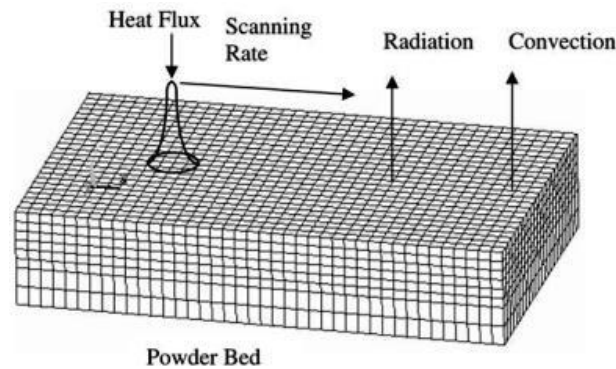


Figure 9 Bilan thermique (Dai et Shaw 2005)

Une fraction de l'énergie apportée par le laser est absorbée par la poudre métallique (propriété dépendante de l'état du matériau), tandis que le reste est réfléchi. De l'énergie absorbée, une partie fait monter la température du matériau jusqu'à surpasser son point de fusion, tandis que le reste est dissipé soit par conduction du matériau, soit perdue au niveau de la surface par convection ou rayonnement. Ce bilan thermique peut se résumer avec la formule suivante :

$$\alpha \vec{Q}_L = \vec{Q}_{CD} + \vec{Q}_{CV} + \vec{Q}_R + \vec{Q}_S$$

Où α est la portion d'énergie absorbée par la poudre, \vec{Q}_L est l'énergie apportée par le laser, \vec{Q}_{CD} , \vec{Q}_{CV} et \vec{Q}_R sont respectivement les pertes par conduction, convection et rayonnement, et \vec{Q}_S la chaleur associée aux transformations de phase.

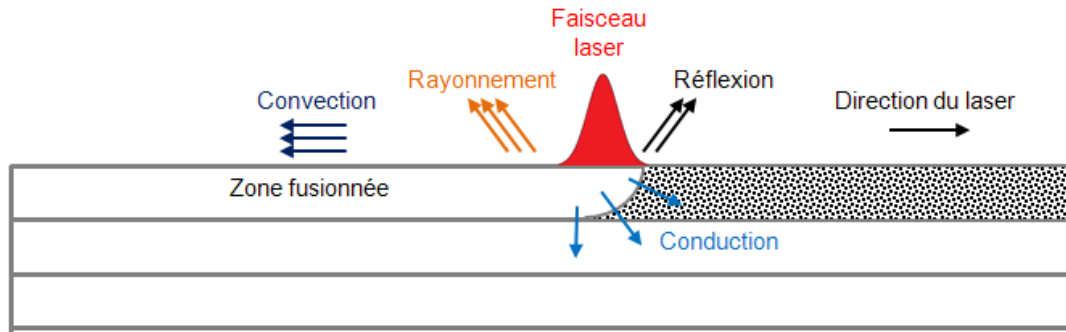


Figure 10 Bilan thermique

II.2.3. Chargements

Comme vu précédemment, le chargement thermique est limité au flux laser. Dans un premier temps, le flux laser fond la poudre pour la convertir en liquide. Puis, suivant l'équilibre thermique avec l'évacuation de la chaleur par convection, réflexion, rayonnement et conduction (Figure 10), le liquide se solidifie pour devenir une pièce solide homogène à échelle macroscopique.

Le modèle le plus utilisé afin de représenter l'irradiation laser est le Gaussien, qui définit une distribution symétrique avec une irradiation maximale au centre du faisceau, et une diminution exponentielle à mesure que l'on s'en éloigne (Figure 11).

$$I(r) = I_0 e^{-2r^2/R^2}$$

Où I est l'irradiation qui dépend du point étudié r , avec I_0 l'irradiation maximale au point central et R le rayon du faisceau laser.

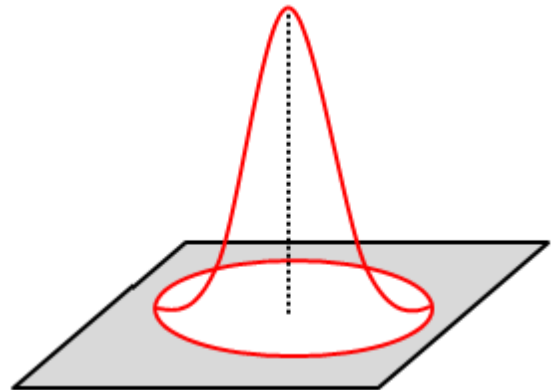


Figure 11 Modèle de flux laser Gaussien

Pour ce projet, la forme cylindrique a été utilisée pour modéliser le flux laser. Cette forme cylindrique est une approximation moyenne de la distribution Gaussienne qui représente un équivalent cylindrique de la distribution de densité de flux thermique.

Ainsi, partant de l'expression du flux cylindrique,

$$q_{cyl} = \frac{P}{A}$$

$$q = \frac{1}{A} \int_S I dA = \alpha \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \frac{2P}{\pi R^2} e^{-2r^2/R^2} 2\pi r dr$$

Avec q le flux laser Gaussien, q_{cyl} le flux approximé pour la distribution cylindrique, P sa puissance, α l'absorption de la surface affectée par le laser, A la surface pointée et R le rayon du laser.

Sachant que l'expression $\int_0^R e^{-2r^2/R^2} \left(\frac{4r}{R^2}\right) dr$ est une intégrale définie et sa valeur est

$$\int_0^R e^{-2r^2/R^2} \left(\frac{4r}{R^2}\right) dr = [e^{-2r^2/R^2}] = 1 - e^{-2}$$

Alors, le flux moyen a pour valeur

$$\bar{q} = \left(1 - \frac{1}{e^2}\right) \alpha \frac{P}{\pi R^2} = 0.864 \alpha \frac{P}{\pi R^2} = 0.864 \alpha q_{cyl}$$

Cette approximation a été utilisée par (Shi et al. 2007) pour la prédiction du champ thermique et la déformation de la plaque support.

II.2.4. Equations de transmission de la chaleur

Une fois la définition des chargements effectuée, les équations de transmission de la chaleur permettent de relier les deux et d'apporter des informations sur le bilan thermique.

Le laser se déplace dans le plan de fabrication à une vitesse donnée. Les différents états du matériau peuvent être considérés comme un état semi-continu qui suit la loi de Fourier sur la conductivité thermique. En accord avec (Pop et Ingham 2001), l'équation de transmission de la chaleur pour un matériau isotopique est donnée par :

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \nabla (k \nabla T) + \dot{q}$$

Où ρ est la densité, C la capacité thermique spécifique, k est la conductivité thermique, v la vitesse du laser et \dot{q} est la vitesse d'apport ou évacuation de la chaleur vers le système.

Le mouvement rapide du laser implique un problème transitoire, qui a, pour chaque pas de temps, le bilan énergétique suivant :

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla (k \nabla T) + \dot{q}$$

Ensuite, quand le matériau change d'état, la chaleur latente de fusion ou de solidification est impliquée. Ainsi, une quantité d'énergie importante va influencer les équations de transmission de la chaleur. Pour modéliser cette énergie, et suivant les travaux de (Roberts 2012; Matsumoto et al. 2002), la méthode utilisée est l'appelée changement d'enthalpie, qui suit l'équation suivante.

$$dH = C_p dT$$

Couplant les deux équations précédentes, le résultat est le suivant :

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = \nabla \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q}$$

Avec H l'enthalpie et x, y, z les axes principaux qui définissent les directions de fabrication.

Finalement, les deux énergies qui assurent le bilan thermique sont les pertes par convection et rayonnement. Dans ce cas, une convection naturelle (q_{conv}) dans l'air et un rayonnement (q_{ray}) avec une émissivité (ϵ) moyenne ont été définies. Pour le rayonnement, la loi de Stefan-Boltzmann a été utilisée, avec une constante $\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$.

$$q_{conv} = h(T - T_0)$$

$$q_{ray} = \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4)$$

II.3. Modélisation thermomécanique

II.3.1. Les propriétés des matériaux

Les graphiques utilisés pour définir ces propriétés en fonction de la température sont situés en annexe (Roberts 2012).

Comme précédemment avec les propriétés thermiques, ANSYS® a permis de définir les valeurs pour des températures différentes, fait très important pour bien modéliser les contraintes thermiques.

II.3.2. Comportement mécanique

Pour simuler le comportement mécanique intervenant lors du procédé SLM, deux domaines avec des comportements mécaniques différents ont été définies : le domaine de déformation élastique, puis une fois la limite élastique dépassée, le domaine de plasticité dépendant de la vitesse de déformation (viscoplasticité).

Ainsi la déformation globale (ϵ) de la pièce peut être définie de la forme suivante :

$$\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{in} + \epsilon_{th}$$

Avec ϵ_{el} , ϵ_{in} respectivement les déformations élastique et inélastique, et ϵ_{th} la déformation provoquée par les changements de volume dus aux changements de température et de phase. Celle-ci peut se définir à partir de la formule suivante :

$$\epsilon_{th} = \beta \Delta T$$

Où β est le coefficient d'expansion thermique.

Le champ de déformations élastiques est couplé au champ de contraintes. La loi de Hooke avec la matrice *stress-strain* $[D]$ permet ce passage :

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon_{el}\}$$

Qui sous forme de vitesse est :

$$\{\dot{\sigma}\} = [D]\{\dot{\varepsilon}_{el}\}$$

Une fois le domaine élastique caractérisé, le domaine plastique peut être défini, et plus particulièrement, le champ de déformation ε_{in} et le champ de vitesse $\dot{\varepsilon}_{in}$. La vitesse de déformation inélastique est dépendante de la vitesse de déformation plastique et de la vitesse de déformation viscoplastique ($\dot{\varepsilon}_{in} = \dot{\varepsilon}_p + \dot{\varepsilon}_{vp}$) mais aussi de la façon suivante :

$$\dot{\varepsilon}_{in} = \gamma \langle \Phi \rangle$$

Où γ est la viscosité du matériau et $\langle \Phi \rangle$ une fonction qui est divisée en domaine élastique et domaine plastique, soit :

$$\langle \Phi \rangle = 0 \text{ si } f \leq 0 \text{ (zone élastique)}$$

$$\langle \Phi \rangle = \Phi \text{ si } f > 0 \text{ (zone inélastique)}$$

le critère de plasticité $f = \sigma - \sigma_0$ avec σ_0 la limite d'élasticité

Finalement, pour définir la fonction Φ le critère de PEIRCE, déjà intégrée sur ANSYS®, est l'utilisée pour modéliser le phénomène de viscoplasticité. Ce critère est donné par les formules suivantes :

$$\Phi = \left(\left(\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0} \right)^{1/m} - 1 \right)$$

$$\bar{\sigma} = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{in}}{\gamma} \right)^m \right] \bar{\sigma}_0$$

$\bar{\varepsilon}_{in}$ la vitesse de déformation inélastique
 m la vitesse de déformation liée à l'écrouissage
 γ la viscosité
 $\bar{\sigma}$ la contrainte équivalente
 $\bar{\sigma}_0$ la limite élastique statique

Finalement, cette fonction nécessite la définition d'une loi de comportement plastique qui soit indépendante de la vitesse de déformation. En conséquence, l'utilisation d'une loi d'écrouissage bilinéaire isotropique est nécessaire, option aussi intégrée dans le logiciel. Cette loi définit une expansion du domaine élastique suite aux charges appliquées sans déplacer son centre. Ce critère de plasticité dépend d'une variable scalaire R et est défini par :

$$f = \sigma - R - \sigma_0$$

Cette loi définit un décalage du domaine élastique par une augmentation de la limite élastique (point M de la Figure 12) tandis que le centre du domaine élastique reste fixe (point O de la Figure 12).

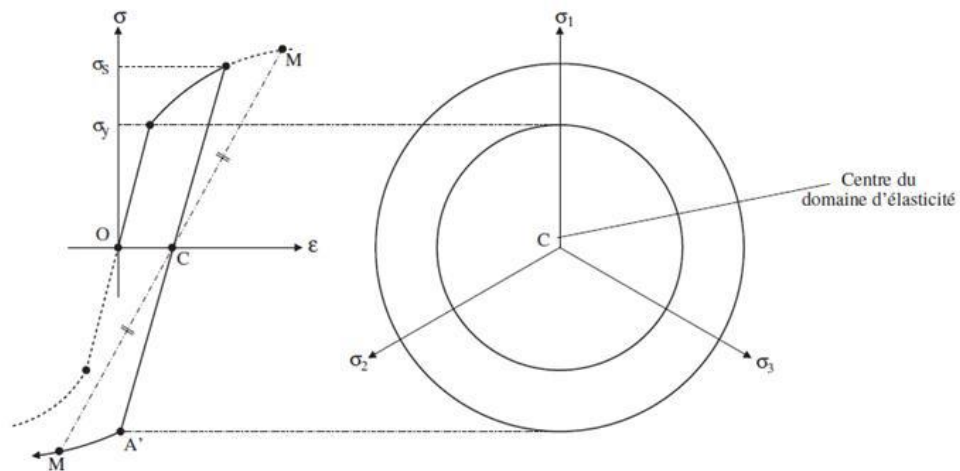


Figure 12 Evolution de la limite d'élasticité avec la loi d'écrouissage isotropique bilinéaire

II.3.3. Chargements et Conditions aux limites

Pour l'étude mécanique, le chargement est donné par les résultats de l'étude thermique (chargement thermique). Ainsi, un fichier « .rth » a été créé et contient tous les résultats obtenus suite à l'étude thermique. Les températures nodales sont récupérées pour chaque analyse thermique et utilisées comme conditions initiales de chaque analyse mécanique équivalente. De plus, il faut s'assurer que le problème mécanique soit isostatique. Pour ce faire, des conditions aux limites mécaniques doivent être appliquées. Ainsi, les conditions aux limites ont été définies le plus proches possible de la réalité (Figure 13). Ces conditions ont été extraites de la thèse de (Van Belle 2013) et vérifiées par les experts d'Altran travaillant sur ce sujet. La surface inférieure du support est appuyée et ses quatre coins encastres, comportement identique à celui observable sur les machines EOS, par exemple.

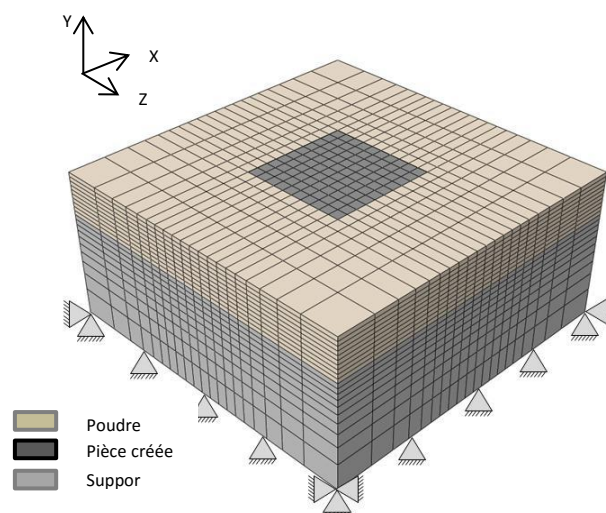


Figure 13 Conditions aux limites mécaniques

Il est important d'ajouter que les conditions aux limites mécaniques n'ont pas d'impact significatif sur les contraintes résiduelles issues du procédé SLM. En effet, les contraintes induites sur la pièce dues à la déformation de la plaque sont vraiment petites par rapport aux contraintes thermiques provoquées par le passage du laser. Le comportement thermomécanique étudié est local. Les conditions aux limites mécaniques permettent seulement d'assurer un problème isostatique.

II.4. Problématique rencontrée

Le but de ce sous chapitre est d'énoncer les principaux problèmes rencontrés et les solutions associées lors de la modélisation du procédé SLM.

Ce sous-chapitre est divisé en deux sous parties qui concernent respectivement la partie thermique et la partie thermomécanique.

II.4.1. Thermique

Les principaux problèmes rencontrés ont été les suivants :

- Augmentation trop élevée de la température de la zone affectée par le pointage du laser.

Ce premier problème engendre une température maximale autour de 15000 °C, dépassant largement la température de vaporisation du TA6V et donc provoquant la création de plasma (élimination totale de la matière).

La solution à ce problème réside dans la modélisation du changement d'état. Dans une première approche, l'analyse comportait une application du laser avec un temps égal à t_M sur une portion de matière modélisée comme poudre. A la fin de cette analyse, la température de la matière était consultée afin de modéliser la transformation d'état

Suite à l'étude d'analyses existantes (thèses), cette modélisation a été modifiée afin d'être mieux adaptée à la réalité. Pour cela il a fallu diviser l'analyse initiale en trois sous-analyses dont le temps d'application est $t_1 = t_M/3$. A la fin de chaque analyse, la température atteinte par la matière est analysée afin de définir le passage de poudre à liquide et le changement associé des propriétés physiques. C'est le changement de ces propriétés qui permet d'être plus proche de la réalité et, donc, d'obtenir des champs thermiques valides (présentés dans les paragraphes suivants).

- Le deuxième problème rencontré concerne la conduction suivant l'épaisseur de la couche.

Pour assurer une bonne adhésion entre la pièce et la plaque support, et aussi entre les différentes couches de la pièce, il faut une fusion partielle de la matière se situant à la couche précédente. Le problème rencontré est que, due à une mauvaise conduction en hauteur, la matière inférieure n'atteint pas une température suffisante pour une fusion partielle.

Pour solutionner ce problème, un changement de volume des éléments lors du changement d'état est pris en compte (connu comme le *shrinkage* et défini aux ANNEXES A.4.). Ainsi, sachant que la densité du TA6V liquide est supérieure à celle de la poudre, la hauteur des éléments qui sont transformés de l'état poudre à l'état liquide diminue. Avec cette réduction de la hauteur, la chaleur est mieux transmise vers le bas et la fusion partielle de la matière et, donc, la bonne adhésion entre couches sont assurées.

II.4.2. Thermomécanique

La première modélisation mise en place était basée sur un modèle élastoplastique qui convergeait vers des contraintes résiduelles inversées. En effet, lors du refroidissement, la matière se contracte et crée des contraintes en traction. Or, les valeurs trouvées étaient en compression. Le problème était le même avec l'échauffement où les contraintes étaient en traction au lieu d'être en compression.

Ce problème a été résolu grâce à des experts en simulation chez Airbus, qui ont suggéré d'utiliser un modèle élastoviscoplastique (présenté précédemment). Grâce à ce changement, les résultats sont inversés et le comportement obtenu est réaliste au niveau des contraintes, c'est à dire des contraintes en compression lors de l'échauffement de la matière et des contraintes en traction lors du refroidissement. Ces résultats sont étudiés et vérifiés dans les chapitres suivants.

II.5. Les limites de l'étude

Avant d'analyser les résultats, il faut définir les limites d'étude de ce projet. Tout d'abord, il faut savoir que cette étude représente une première approche de la modélisation du procédé de fabrication additive SLM pour Altran. Ainsi, pour commencer, la modélisation a été réalisée à échelle macroscopique, c'est-à-dire, en analysant les phénomènes physiques qui ont lieu à une échelle autour de 25 μ m (taille équivalente à 4-5 grains).

Avec ce niveau de précision, les contraintes résiduelles qui vont être principalement étudiées sont les contraintes macro-résiduelles (σ^I).

Les contraintes résiduelles dues au changement de phase (σ^{II}), sont aussi étudiées mais avec un niveau de précision plus bas. En effet, la taille des éléments subissant une transformation de phase n'a pas été étudiée au niveau microscopique. La deuxième approximation concernant ces contraintes a été le fait que la mécanique des fluides n'a pas été étudiée. En conséquence il manque de la précision au niveau du bain de fusion et des écoulements intervenant lors du changement de phase. Finalement, les contraintes micro-résiduelles (σ^{III}) résultantes des dislocations à échelle atomique n'ont pas été étudiées étant donné la complexité du problème.

Les perspectives de ce projet au sein d'Altran, évolueront donc vers une diminution de l'échelle d'étude afin de modéliser à l'échelle de la microstructure. Cette échelle devra prendre en compte les différentes phases (niveau microstructure) existantes lors de la fabrication, tels que les changements de phase et les écoulements fluidiques associés.

CHAPITRE IV Validation du modèle numérique

Ce chapitre traite des résultats thermiques et mécaniques obtenus lors de la simulation par éléments finis.

Tout d'abord, les résultats thermiques permettent de définir le champ transitoire de températures lors de la fabrication d'une pièce composée de trois couches. Ensuite, des études sur les vitesses d'échauffement et de refroidissement, ainsi que sur la conduction suivant la profondeur de l'ensemble, sont réalisées. Finalement, les températures maximales selon la couche et le refroidissement de l'ensemble entre deux couches sont analysées.

Concernant l'étude mécanique, suite à la modélisation d'une pièce composée d'une seule couche (par souci de limitation du temps de calcul), le champ transitoire de contraintes ainsi que les contraintes résiduelles après la relaxation de la pièce sont étudiés. De plus, l'évolution du champ de contraintes suivant la profondeur et la contrainte hydrostatique sont analysés.

L'ensemble de ces études permettent la validation du modèle thermomécanique.

IV.1. Validation des résultats thermiques

Comme mentionné précédemment, le champ de températures multicouches a été réalisé à partir de la modélisation d'une pièce constituée de trois couches et suivant les explications du Chapitre II.

Les paramètres utilisés pour cette simulation sont ceux du Tableau 1.

Etant donné la complexité et le temps nécessaire pour réaliser le calcul, les dimensions, tant de la plaque support que de la pièce, sont extrêmement petites (entre 1 et 3 mm). Cependant, ces dimensions sont utilisés par la plupart des articles consultés (Zeng et al. 2015; Roberts 2012). Ainsi une comparaison des résultats est effectuée et l'obtention de résultats proches de ceux présentés dans la bibliographie montre la fiabilité des résultats obtenus. Il est ensuite possible de faire une extrapolation de ces résultats à des pièces réelles suivant la méthode EigenStrain.

La Figure 14 illustre le champ transitoire de températures à quatre instants différents lors de la fusion de la troisième et dernière couche. Ce champ est pratiquement identique à celui de la première et deuxième couche. Ainsi, il est possible d'observer les aspects suivants :

- L'ensemble est maintenu à une température constante et stable au cours du passage laser. Ceci s'explique du fait que la source laser est appliquée, à chaque pas de temps, sur une surface très petite par rapport à la surface totale de la pièce globale (0.11%) et donc, par effet de conduction, la zone affectée thermiquement est celle qui se trouve autour du *hatch* traité. L'échauffement global de l'ensemble au cours de la fabrication de la pièce est étudié au « IV.2.1. Température accumulée par le système ».
- La vitesse de refroidissement est inférieure à celle d'échauffement. Cet écart provient du fait que le champ de températures en aval du laser présente des valeurs supérieures à celles en

amont. Pour vérifier cette variation de vitesse, une analyse a été réalisée et est présentée au « Chapitre IV.2.2. Vitesses d'échauffement et de refroidissement ».

- Le champ de températures est pratiquement le même pour les quatre instants illustrés. Ceci est réaliste et conforme avec les résultats trouvés par (Roberts 2012; Van Belle 2013).
- Le flux laser provoque une concentration de la température maximale au point d'application, et les valeurs maximales dépassent, en tout instant, la température de fusion du Ti6Al4V, comme vu au « Chapitre IV.2.3. Température maximale de chaque couche ».
- La température maximale est éloignée de la température de vaporisation du Ti6Al4V. Or, ceci est nécessaire pour éviter la formation de plasma. De plus, cette transformation provoquerait une élimination totale de la matière (Schneider 1998).

PARAMETRES DE FABRICATION	
GEOMETRIE PIECE FINALE	
Longueur de la pièce finale	1 mm
Largeur de la pièce finale	1 mm
Epaisseur de la couche	30 μ m
Nombre de couches - analyse thermique	3 couches
Nombre de couches - analyse mécanique	1 couche
GEOMETRIE LIT DE POUDRE	
Longueur du lit de poudre	3 mm
Largeur du lit de poudre	3 mm
GEOMETRIE PLAQUE SUPPORT EN ACIER	
Longueur de la plaque support	3 mm
Largeur de la plaque support	3 mm
Epaisseur de la plaque support	0,3 mm
TEMPERATURES	
Température de fusion du lit de poudre	1660 °C
Température de vaporisation du TA6V liquide	3287 °C
Température initiale de la plaque d'acier	80 °C
CONVECTION ET RAYONNEMENT	
Coefficient de convection h	20 W/ (m K)
Emissivité moyenne	0,75
Température de la chambre	80 °C
LASER	
Modèle	Nd:YAG
Puissance	195 W
Vitesse	1,2 m/s
Diamètre	100 μ m
Profil	Gaussien
STRATEGIE DE BALAYAGE DU LASER	
Nombre de <i>stripes</i>	10
Nombre de <i>hatches</i>	10
Espace entre <i>hatches</i>	100 μ m

Tableau 1 Paramètres de fabrication - étude thermique

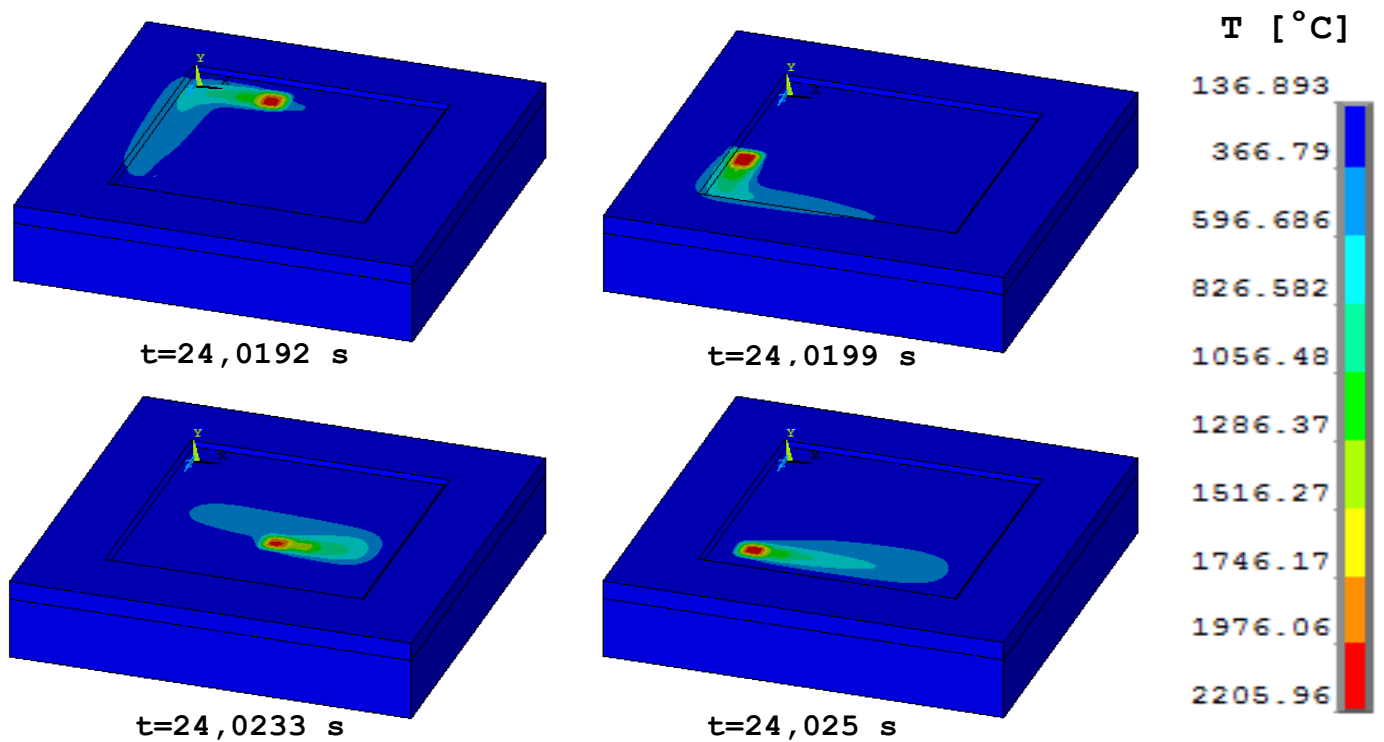
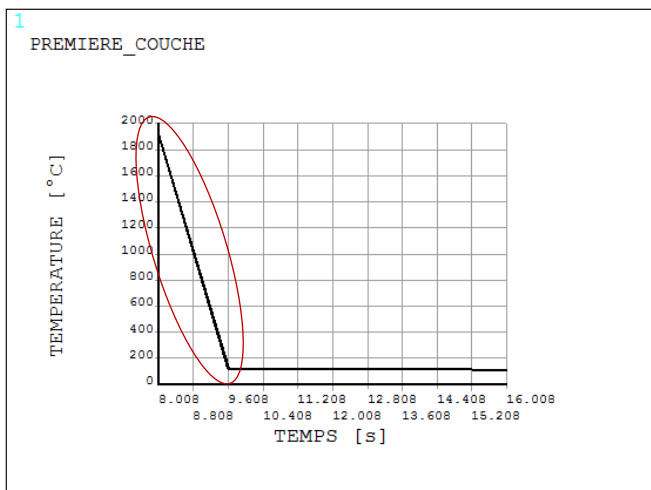


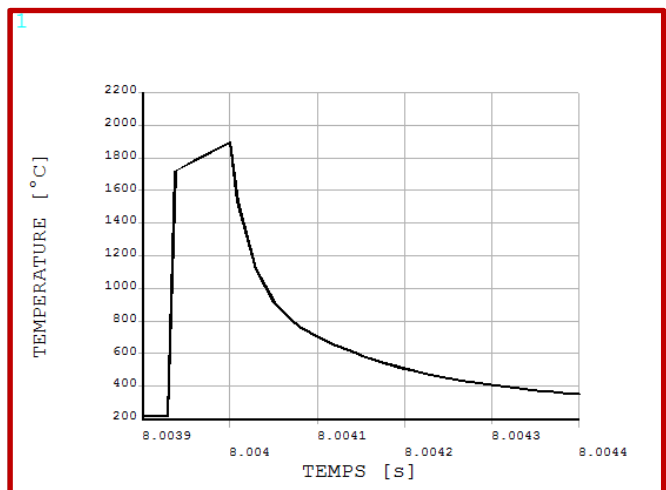
Figure 14 Champ de températures à des instants différents pour la troisième couche

IV.2.1. Température accumulée par le système

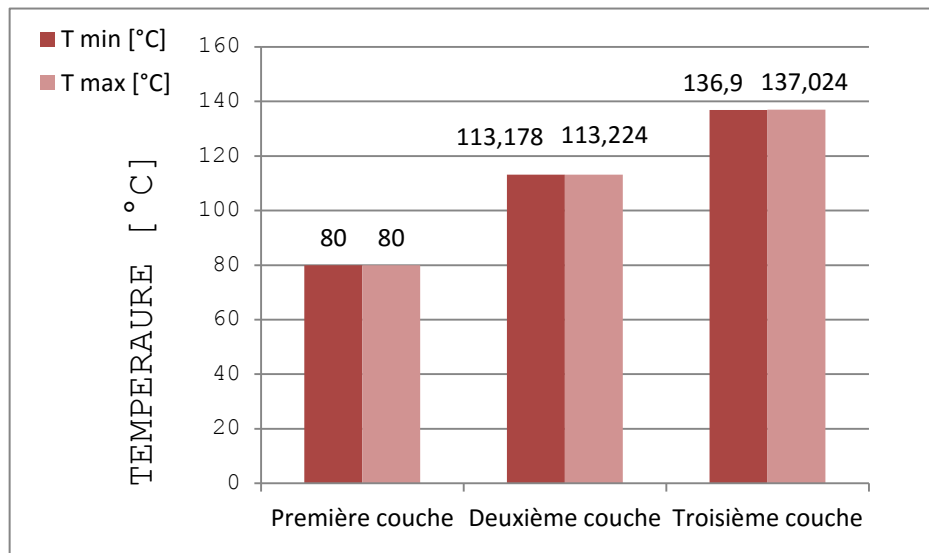
Cette section concerne l'évolution de la température maximale du système lors du traitement de chaque couche. Lors de la fabrication de la pièce, un temps de refroidissement (Graphique 2 et Graphique 1) entre deux couches successives est appliqué. Il s'agit du *recoating time*, le temps de dépôt d'une nouvelle épaisseur de poudre métallique. Pendant ce temps, la chaleur est dissipée vers le bas par conduction avec le matériel sous-jacent et vers le haut avec la nouvelle poudre métallique déposée. Ce phénomène provoque, finalement, une augmentation de la température globale du système. Cette augmentation est visible, Graphique 3, où une stabilisation de la température (températures maximales et minimales pratiquement égales) est observable.



Graphique 2 Evolution de la température entre la première et la deuxième couche



Graphique 1 ZOOM Evolution de la température entre la première et la deuxième couche



Graphique 3 Température minimale et maximale au début du traitement de chaque couche

IV.2.2. Vitesses d'échauffement et de refroidissement

Ce chapitre permet de calculer les vitesses d'échauffement et de refroidissement lors du pointage laser sur un *hatch*. Ce calcul a pour but de déterminer si ces vitesses sont adaptées à l'intervalle trouvé par (Steen 2003). Pour des techniques basées sur l'application laser, l'intervalle se situe entre $10^3 K/s$ et $10^{11} K/s$.

Dans ce but, quatre nœuds aléatoires de la première couche ont été choisis, (Figure 15). Ensuite, les graphiques (Graphique 4 [A], [B] et [C]) montrent l'évolution de la température de ces nœuds pendant le traitement de chaque couche.

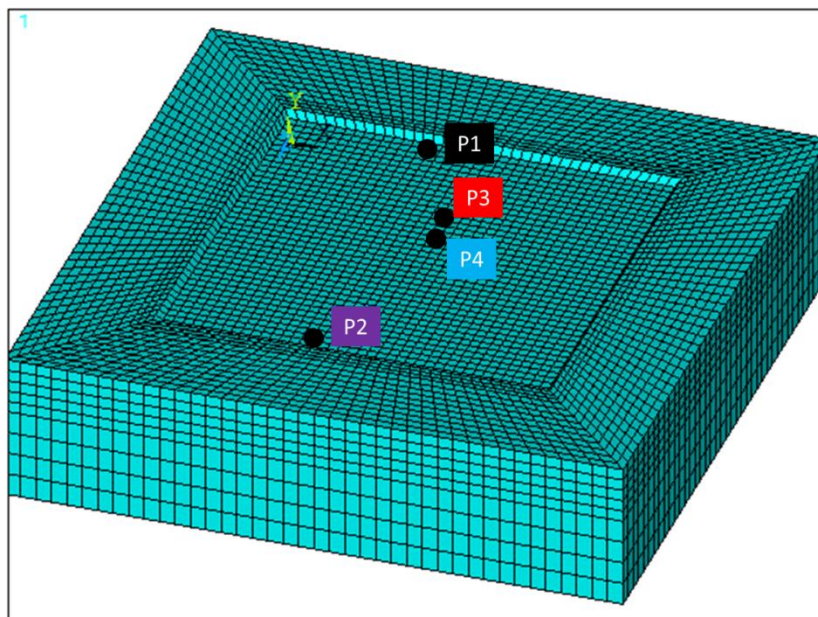
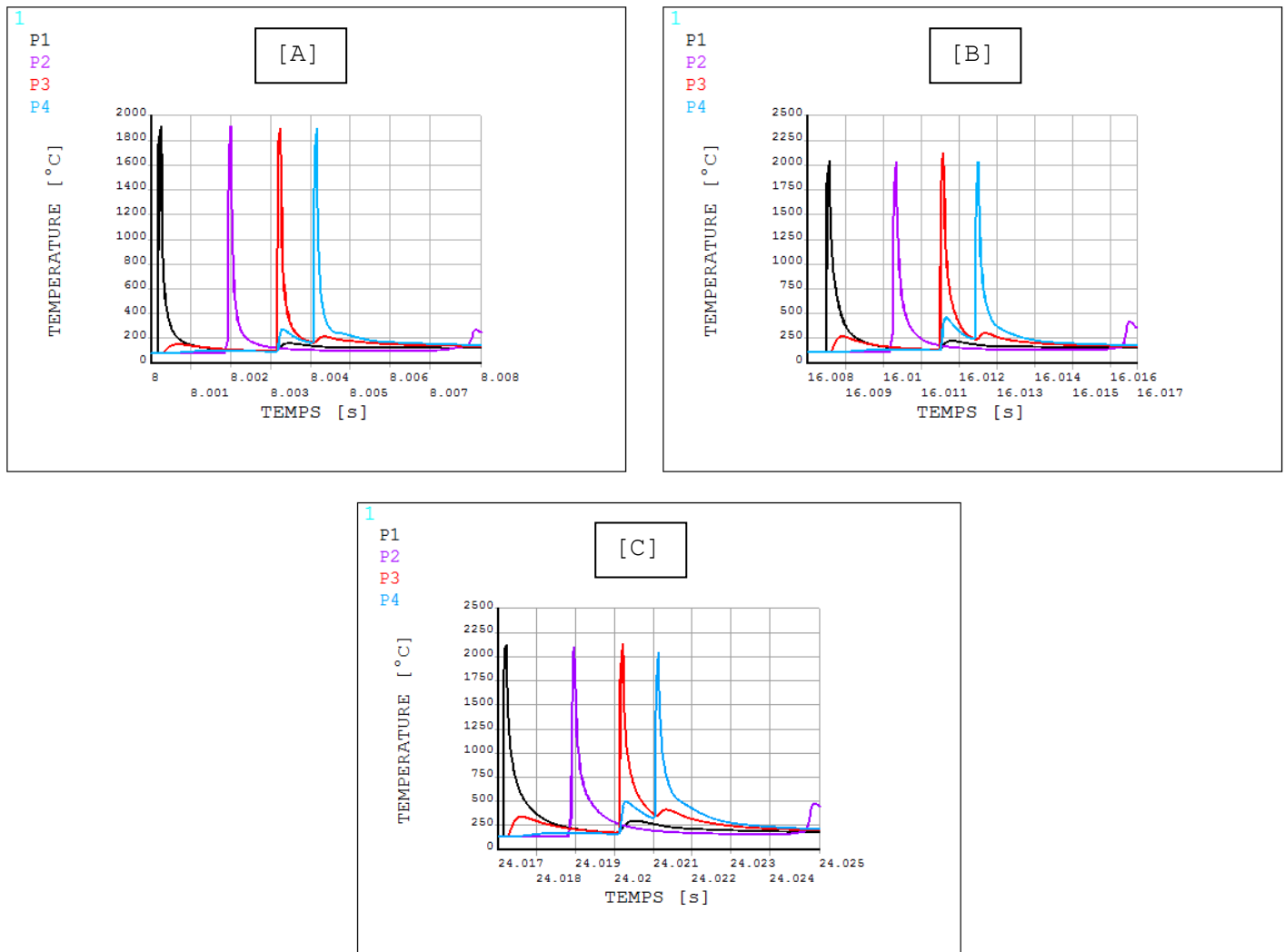


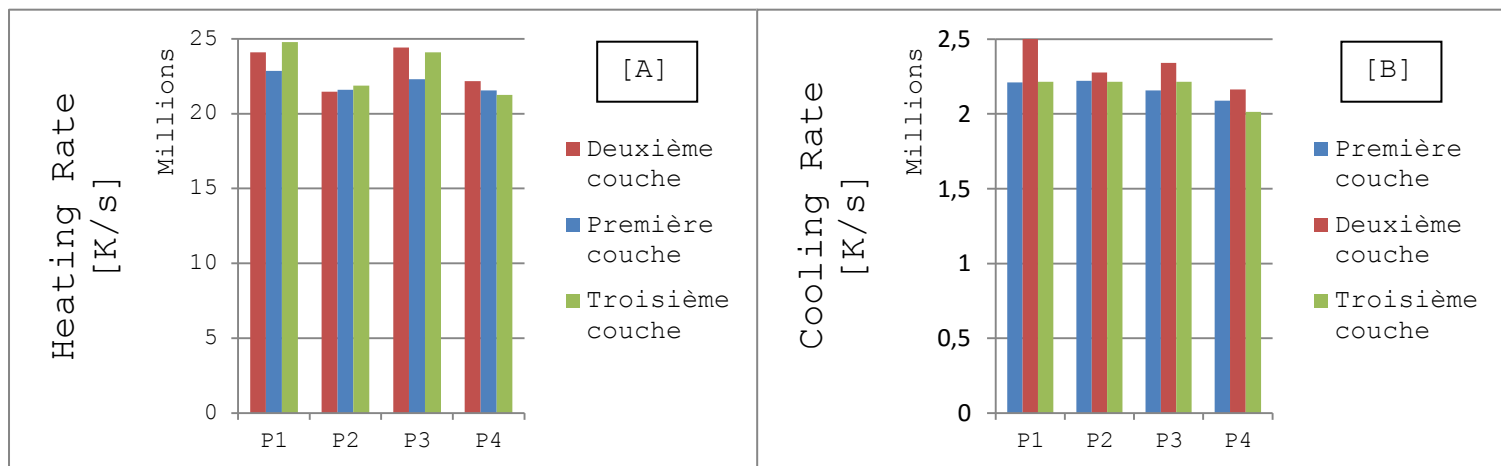
Figure 15 Points sélectionnés pour l'étude des vitesses



Graphique 4 Vitesses d'échauffement et de refroidissement [A] Première Couche; [B] Deuxième Couche; [C] Troisième Couche

Il est possible d'observer à partir du Graphique 4 que la vitesse d'échauffement est plus élevée que celle de refroidissement. Ceci est bien en accord avec le champ de températures de la Figure 14. De plus, la variation du champ de températures transitoire entre les différentes couches est pratiquement négligeable. En effet, les vitesses sont du même ordre de grandeur pour les trois couches. Finalement, il est possible d'observer à partir des courbes de températures tracées pour les points P3 et P4 que le passage du laser par les *stripes* aux alentours du nœud provoque une petite augmentation de sa température, et cela, même si le laser n'est pas encore passé par son *hatch*. Ceci s'explique, comme annoncé précédemment, par le concept de la zone affectée thermiquement (HAZ) dû à la transmission de la chaleur par conduction interne.

Les valeurs des vitesses d'échauffement et de refroidissements sont réunies dans le Graphique 5. La moyenne finale, calculée à partir de chaque point et de chaque couche, est égale à $2,21 \cdot 10^6 \text{ K/s}$ pour l'échauffement et $7,9 \cdot 10^5 \text{ K/s}$ pour le refroidissement. Ces dernières valeurs sont bien du même ordre de grandeur que celles définies par (Steen 2003).



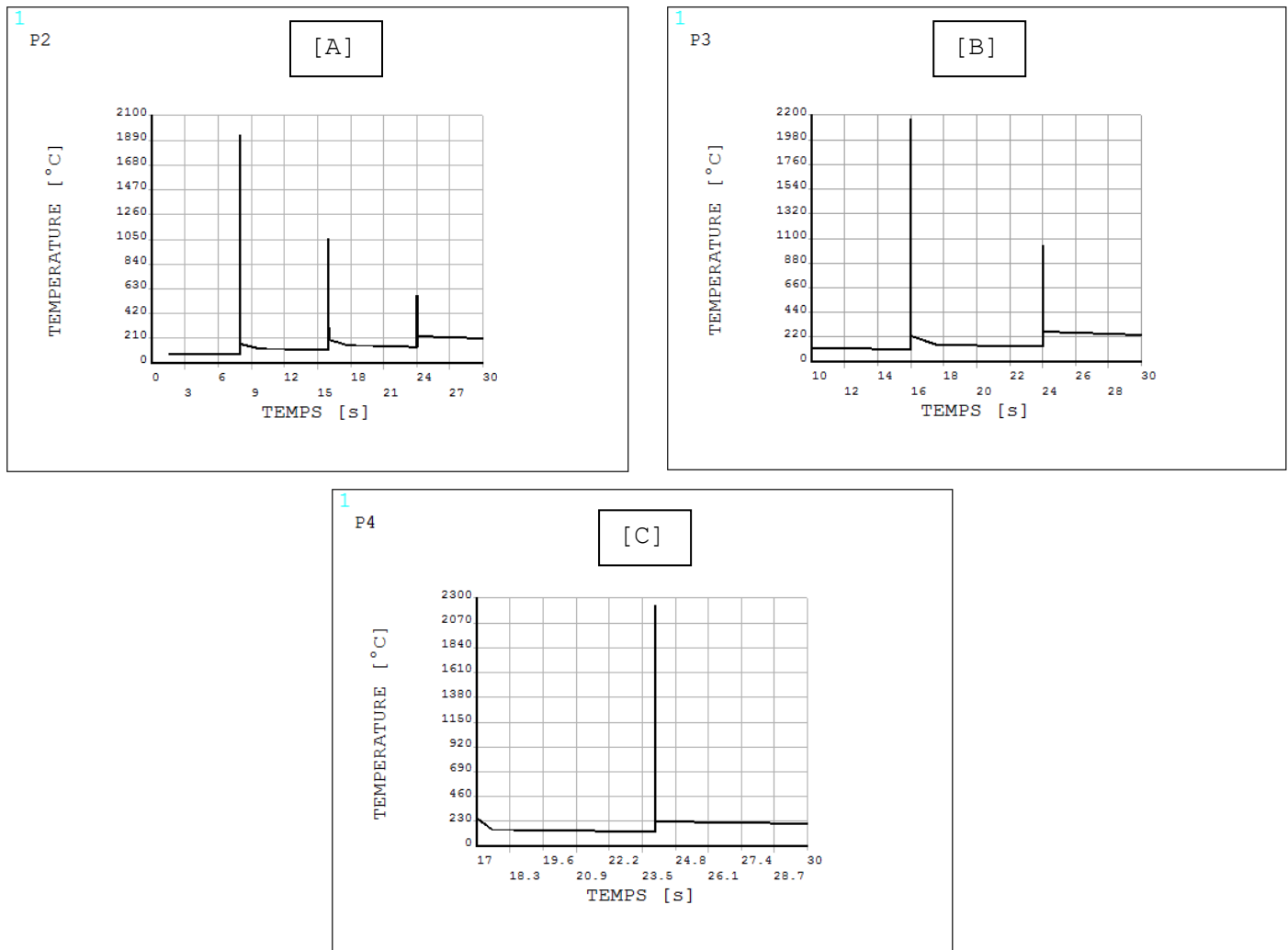
Graphique 5 Vitesses [A] Echauffement, [B] Refroidissement

IV.2.3. Température maximale de chaque couche

Cette troisième étude thermique concerne la vérification des températures maximales pour chaque couche. Comme annoncé précédemment, la fusion totale de la poudre métallique est nécessaire pour réussir à fabriquer des pièces fonctionnelles. Cependant, il est aussi très important d'éviter la création de plasma. Les graphiques suivants permettent d'observer que la température dépasse toujours le point de fusion (1660°C pour le Ti6Al4V). Ainsi, la transformation de l'état solide à l'état liquide (absorption d'une partie de la chaleur apportée par le laser) se produit bien. Ensuite, une fois que le laser est déplacé, le liquide refroidi et la matière se solidifie ensuite, finissant par une phase solide homogène à échelle macroscopique.

Le Graphique 5 permet aussi d'observer l'échauffement de la couche n-1 pendant le traitement de la couche n. Ce fait sera vérifié au « Chapitre IV.2.4. Variation du champ de températures avec la profondeur ». Il permet d'étudier la variation de la température en hauteur et, donc, la transmission de la chaleur par conduction suivant l'axe Y de la modélisation.

Ainsi, pour clarifier les valeurs affichées au Graphique 6 la température maximale pour la première couche est de $1980,17^{\circ}\text{C}$, de $2158,49^{\circ}\text{C}$ pour la deuxième et de $2199,51^{\circ}\text{C}$ pour la troisième couche. Les trois valeurs sont du même ordre de grandeur, cependant la première couche atteint une température inférieure à celle des autres couches. Cela s'explique par le fait que la première couche est en contact avec la plaque en acier, alors que les autres sont en contact avec les couches en Ti6Al4V solide. Or, l'acier a une conductivité thermique inférieure à celle du titane, et donc la chaleur a moins de difficultés à être conduite vers la plaque en acier par rapport à une couche en titane.



Graphique 6 Températures maximales [A] Première couche, [B] Deuxième couche, [C] Troisième couche

IV.2.4. Variation du champ de températures avec la profondeur

Cette dernière étude thermique concerne la vérification de la transmission de la chaleur suivant l'axe vertical de la pièce. Cette analyse permet également de démontrer que la fusion d'une couche provoque aussi la fusion partielle des couches inférieures. Pour la première, l'échauffement important provoque également la fusion de la plaque d'acier, comme vérifié par (Roberts 2012; Van Belle 2013). Le Graphique 7 présente l'évolution de la température en fonction de la profondeur (nœud choisis le long du *path* 1-2 illustré Figure 16), permet d'observer que la transmission de la chaleur par conduction vers le bas provoque bien la fusion partielle des couches inférieures.

Cette transmission de la chaleur suivant la profondeur est très importante pour obtenir une bonne adhésion entre la pièce et le support et entre couches pour, ainsi, améliorer les conditions de fabrication (Schneider 1998).

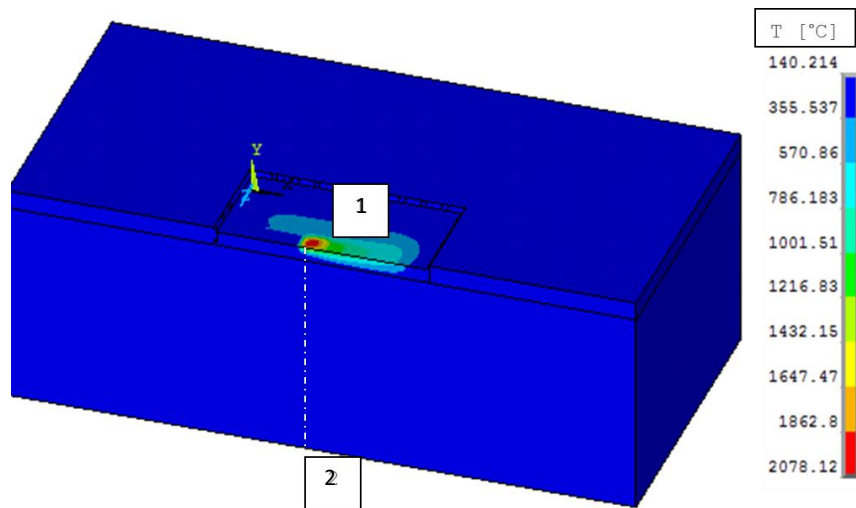
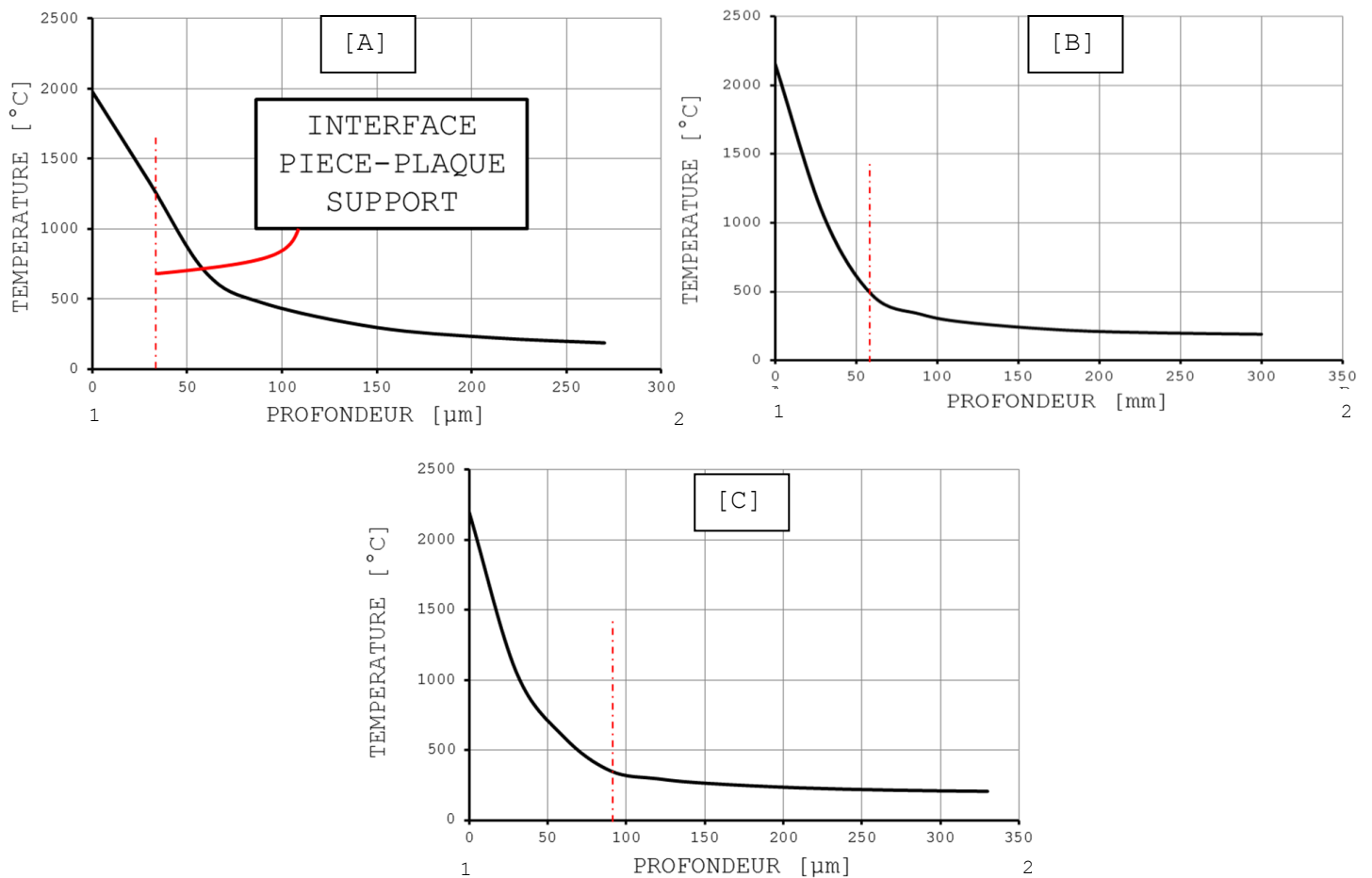


Figure 16 Path 1-2 utilisé pour les graphiques



Graphique 7 Evolution de la température en profondeur [A] Première couche, [B] Deuxième couche, [C] Troisième couche

IV.3. Validation des résultats thermomécaniques

Le but principal, comme annoncé précédemment, est de déterminer les contraintes résiduelles créées lors de la fabrication d'une pièce par SLM. Ce Chapitre présente les résultats obtenus à partir de la simulation d'une seule couche et en utilisant les mêmes paramètres affichés au Tableau 1.

Le chapitre est divisé en différentes études, se focalisant sur les différentes contraintes obtenues lors de la fabrication additive : les contraintes transitoires observées pendant la fabrication de la pièce, les contraintes résiduelles après un refroidissement à l'air pendant 600 secondes, la variation des contraintes résiduelles avec la profondeur de l'ensemble et, finalement, la contrainte hydrostatique.

Pour ces études, les contraintes suivant les trois directions principales sont définies. La première est la direction du laser lors de son passage par le cœur de la pièce. Cette direction est la direction X de la modélisation et sa contrainte est définie comme σ_L (Longitudinale). La contrainte σ_T (Transversale) est celle de direction perpendiculaire au parcours du laser pendant la plupart du traitement, même si pendant le contour initial le laser suit cette direction. Finalement, hors plan de fabrication, la contrainte normale σ_N apparaît.

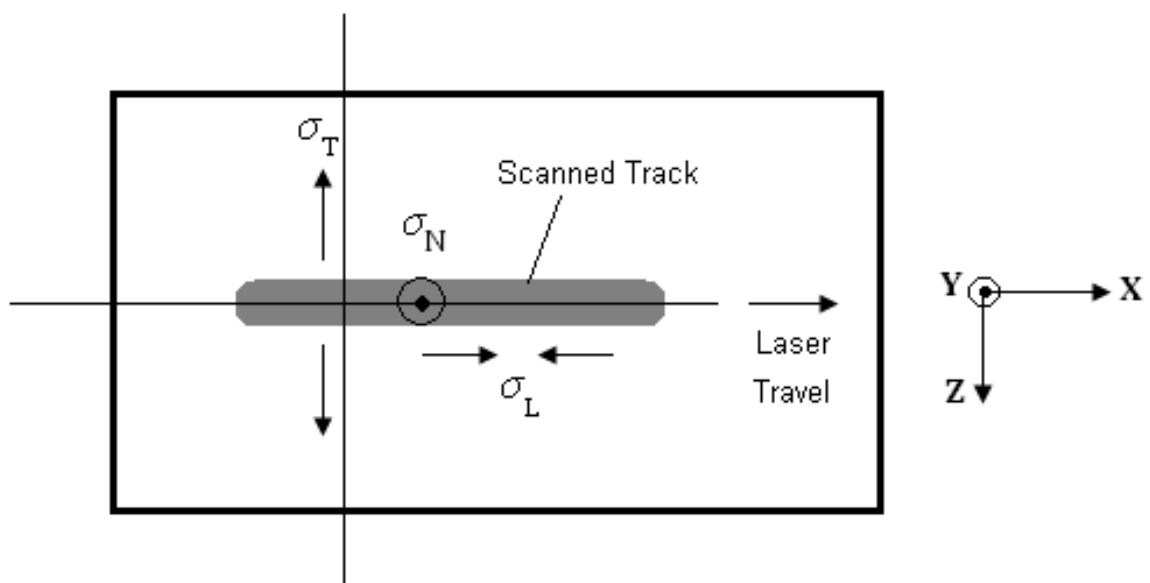


Figure 17 Nomenclature des contraintes utilisées. Source (Roberts 2012)

Lors de l'application du laser sur une portion de matière, les contraintes qui apparaissent sont en compression. Cela provient du fait que le matériau se dilate suite à l'échauffement créant des déformations en traction et, donc, des contraintes en compression provoquées par la matière qui se trouve aux alentours.

Une fois que le laser s'est déplacé, la matière chaude commence à se refroidir et, par conséquent, se contracte. A partir du début de la contraction, les contraintes basculent vers des valeurs en traction. Les figures suivantes permettent de vérifier si le comportement de la modélisation est comparable à celui de la théorie.

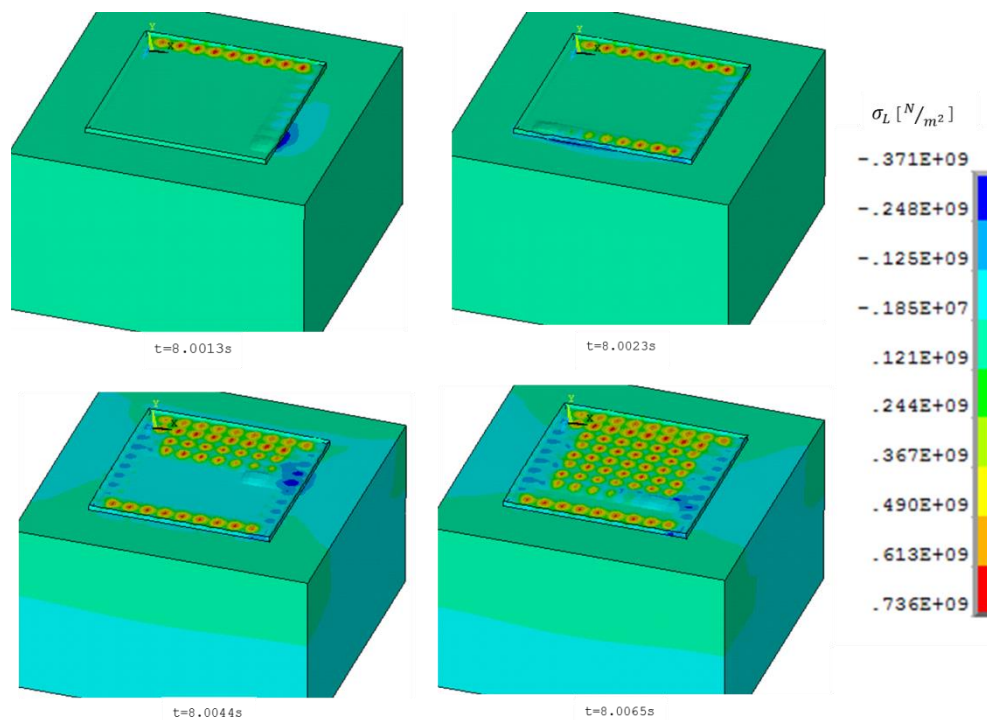
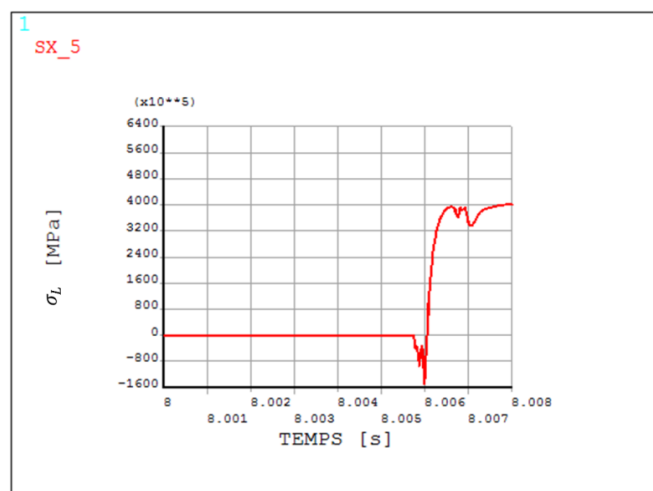


Figure 18 Champ transitoire des contraintes longitudinales

La Figure 18 présente le champ transitoire de contraintes longitudinales pour quatre instants différents pendant la création de la première couche. Effectivement, il est possible d'observer l'évolution des contraintes en compression (régions en bleus), apparaissant initialement lors du chauffage, vers des contraintes en traction (régions en rouges) apparaissant après le refroidissement.

Le Graphique 8 présente le comportement physique du système suite à la prise en compte du couplage entre les analyses thermiques et mécaniques. Il est possible d'y observer que la région étudiée reste sans contrainte jusqu'à l'application du laser. Lors du chauffage, la contrainte de compression apparaît, et atteint la valeur de 160 MPa. Ensuite, quand le laser se déplace, la contrainte passe de la compression à la traction et atteint un maximum local de 400 MPa. Le minimum local suivant (temps de 8,006 s) s'explique par le fait que la zone étudiée, même si elle n'est pas directement affectée par le laser, est chauffée par conduction et une petite relaxation des contraintes en traction est provoqué.



Graphique 8 Evolution de la contrainte longitudinale

Les mêmes conclusions peuvent être effectuées lors de l'étude des contraintes transversales et normales. Le comportement des contraintes transversales est illustré Figure 19.

Les contraintes transversales ont le même comportement que les contraintes longitudinales lorsque le laser, pendant le contour initial, suit la direction Z (deuxième et quatrième *stripes*).

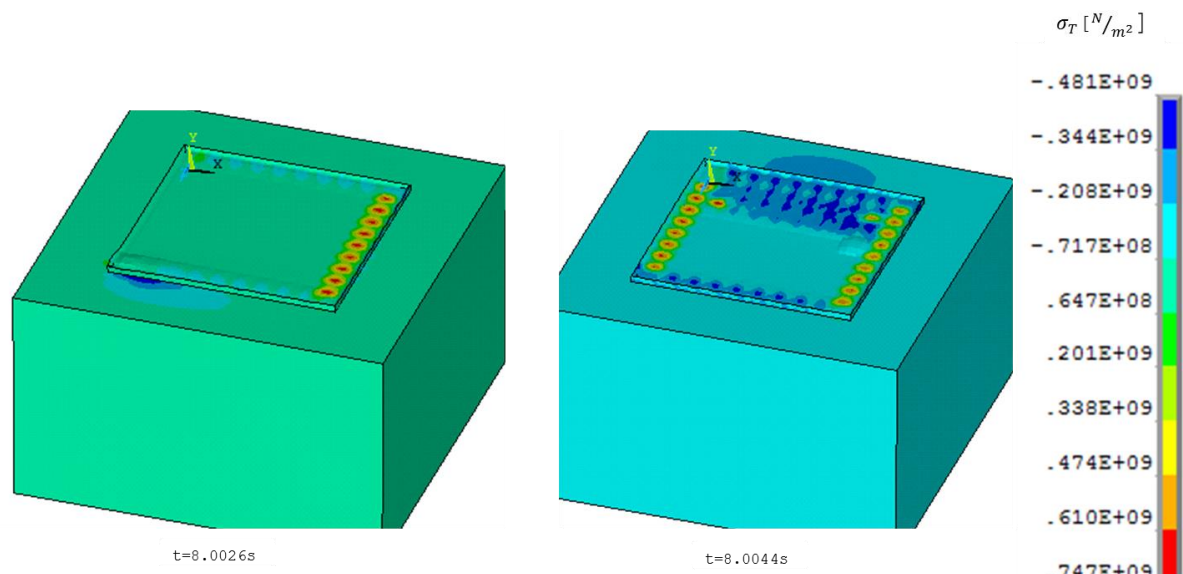
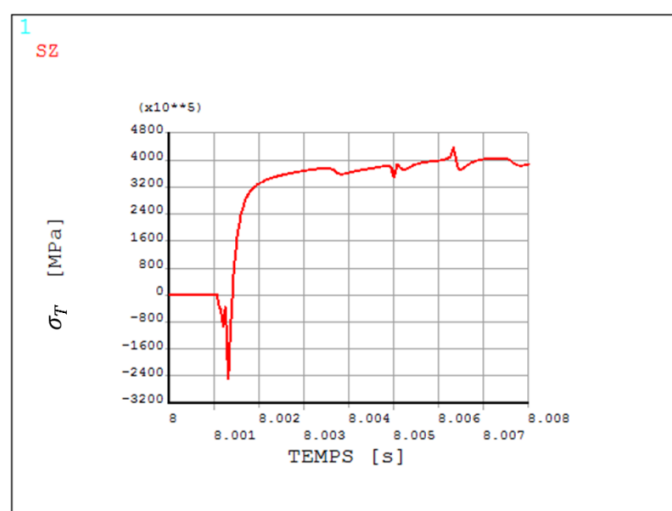


Figure 19 Champ transitoire de contraintes transversales

La contrainte transversale maximale en traction est du même ordre de grandeur que la contrainte longitudinale. Comme vu précédemment, cela provient du fait qu'il y a deux *stripes* du contour initial où la contrainte transversale est vue comme longitudinale dans le repère laser. En revanche, les contraintes transversales en compression sont un peu plus faibles, de l'ordre de 553 MPa. Si pendant tout le traitement d'une couche le laser aurait suivi la direction X, les contraintes transversales auraient été relativement inférieures à celles des contraintes longitudinales, comme étudié par (Dong, Hong, et Bouchard 2005) et confirmé par (Roberts 2012).

Le Graphique 9 présente l'évolution temporelle de la contrainte transversale d'un des nœuds du parcours initial où le laser suit la direction Z. Il est possible d'y observer l'évolution de compression en traction lors du déplacement du laser et, donc, du refroidissement du nœud étudié.



Graphique 9 Evolution de la contrainte transversale

IV.3.2. Champ de contraintes résiduelles

Une fois le champ de contraintes transitoire défini, il faut déterminer quelles sont les contraintes résiduelles de la pièce après un refroidissement naturel de 600 secondes. Les contraintes résiduelles englobent les mêmes directions que les transitoires, et sont présentées sur les figures suivantes.

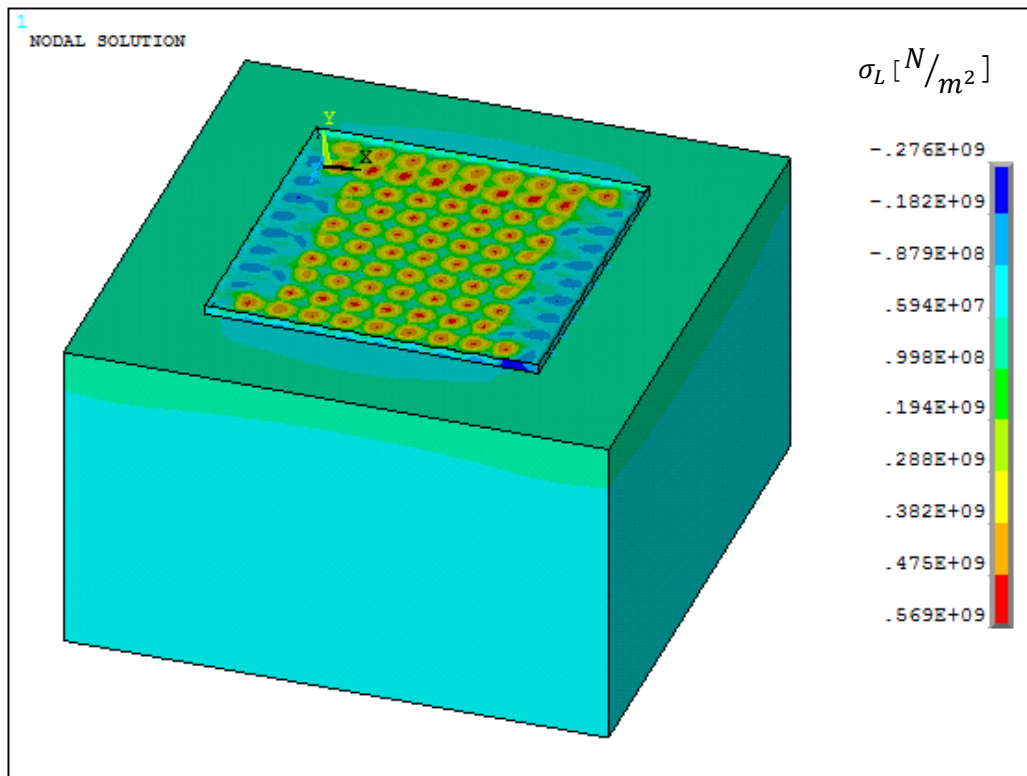


Figure 20 Contraintes résiduelles longitudinales

La Figure 20 montre le champ de contraintes résiduelles longitudinales (suivant l'axe X). Effectivement, les endroits où le laser suit la direction X, les contraintes sont en traction après le refroidissement. La valeur maximale en traction est égale à 569 MPa, et 276 MPa en compression. Ces valeurs sont concordantes avec les résultats obtenus expérimentalement par (Van Belle 2013) et s'adaptent à la réalité. En revanche, elles sont loin des valeurs obtenues par les simulations de (Van Belle 2013) et (Roberts 2012). Cette différence est due, principalement, au critère de plasticité utilisé par chacun. En effet, ils ont utilisé un critère d'élastoplasticité parfait, tandis que, suite aux indications données par des experts d'AIRBUS, ce projet a abordé le problème en proposant un problème d'élastoviscoplasticité. De plus, une autre différence importante peut provenir du fait que (Roberts 2012) ait utilisé une conductivité thermique constante pour la poudre métallique, tandis que dans notre étude cette propriété a été définie comme étant fonction de la température, comme étudié par (Romano, Ladani, et Sadowski 2015).

Ensuite, les contraintes résiduelles transversales (axe Z) ont été étudiées. La Figure 21 présente ce champ, qui a des valeurs maximales en traction et compression respectivement égales à 524 et 288 MPa,

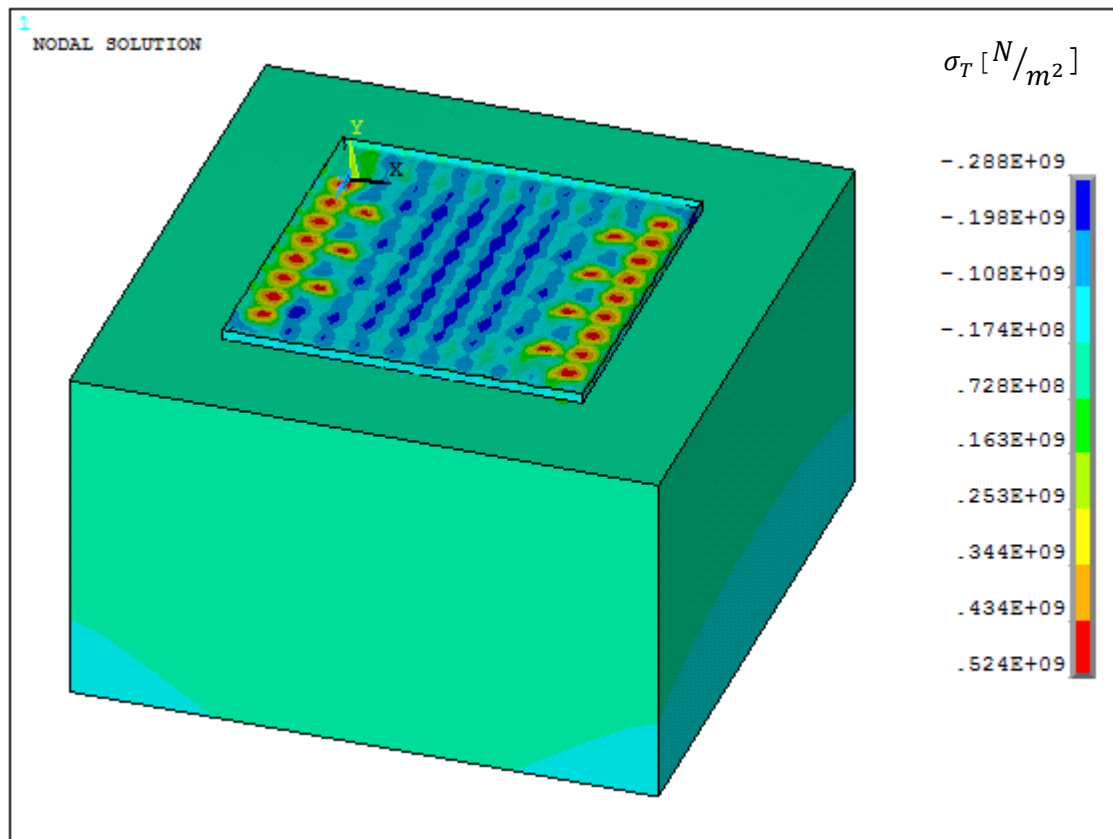


Figure 21 Contraintes résiduelles transversales

Ces valeurs sont clairement provoquées par le passage du laser selon la direction globale Z, comme expliqué précédemment. Sans prendre en compte ces valeurs, en général les contraintes transversales sont inférieures aux contraintes longitudinales, comme étudié par (Dong, Hong, et Bouchard 2005).

Il est maintenant important de commenter la visualisation des pointages laser par des petits carrés sur les figures précédentes. Ces petits carrés sont provoqués par la modélisation discrète du mouvement du laser. Le fait de ne pas modéliser le laser comme une source continue créait des contraintes maximales au centre du pointage qui diminuent avec l'éloignement de ce point. Une modélisation du laser comme une source continue aurait permis d'éviter ce comportement et aurait abouti à de résultats beaucoup plus homogènes.

Finalement, il est possible d'observer que les contraintes normales au plan ont des valeurs inférieures aux contraintes dans le plan, en ayant respectivement des valeurs maximales en traction et compression de 93 et 168 MPa.

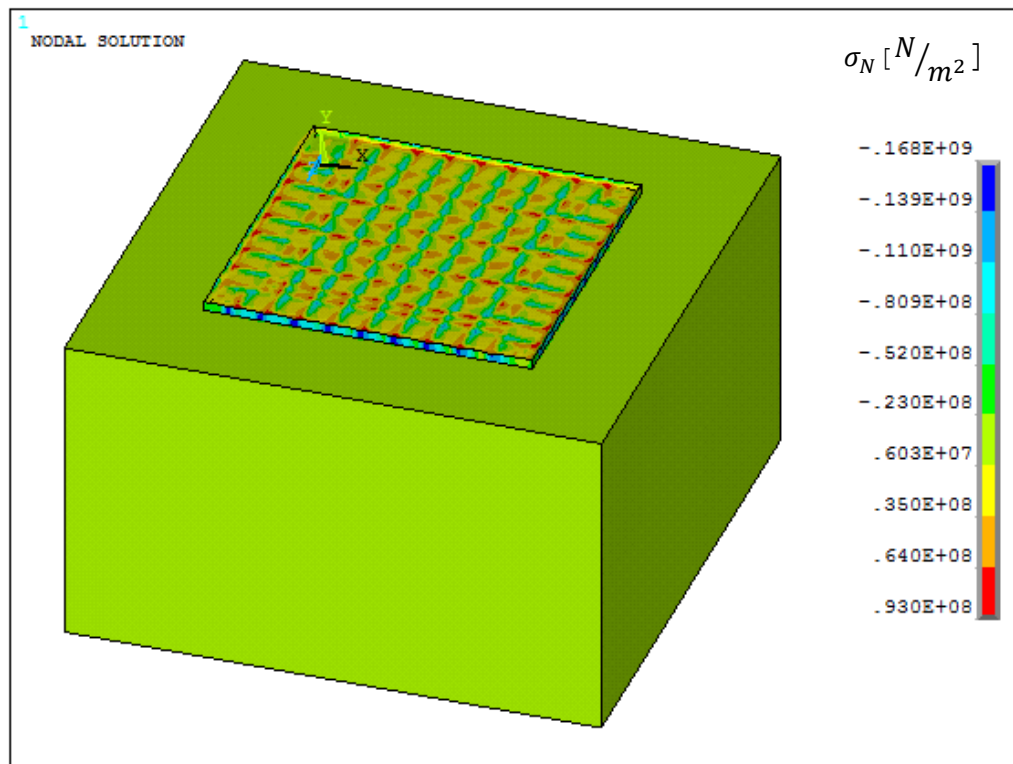


Figure 22 Contraintes résiduelles normales au plan de fabrication

IV.3.3. Variation du champ de contraintes avec la profondeur

Comme précédemment lors de la validation des résultats thermiques, la variation du champ de contraintes avec la profondeur est étudiée. Pour cela, la définition du *path* 1-2 qui part de la surface supérieure de la pièce jusqu'à la surface inférieure de la plaque support (Figure 23) est nécessaire. Le Graphique 10 présente l'évolution de la contrainte résiduelle longitudinale le long de ce path. Les contraintes en traction observées sur la surface supérieure diminuent avec la profondeur jusqu'à se transformer en contraintes en compression. Ces contraintes en compression résistent à la contraction des couches de Ti6Al4V avant de finir en contraintes en traction (point 2).

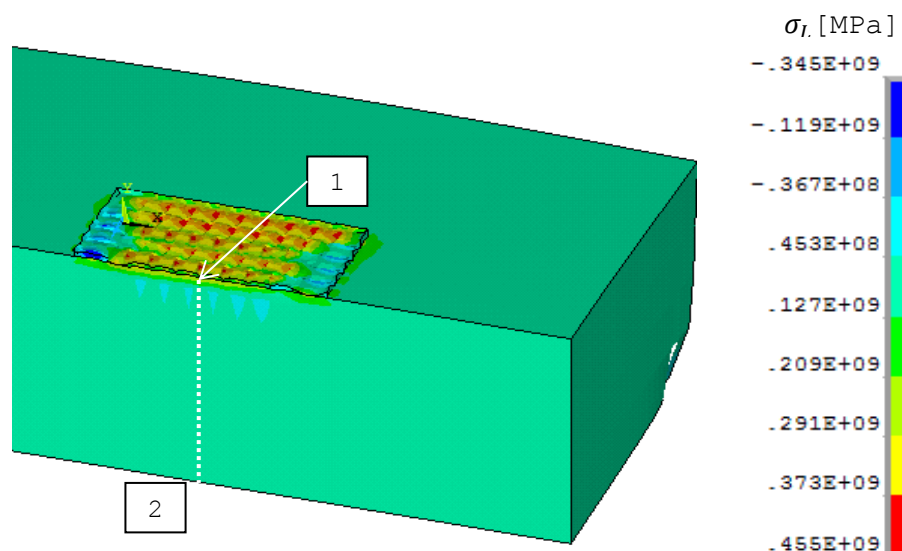
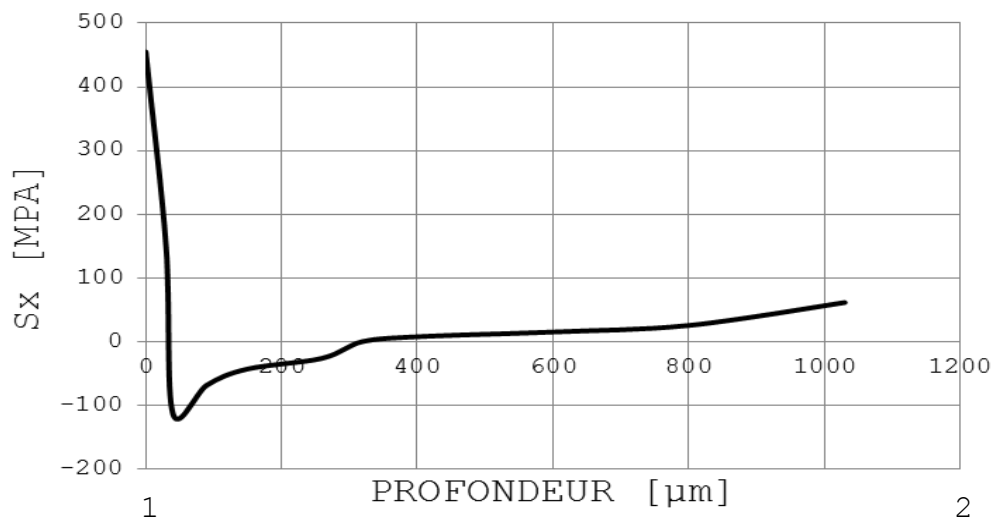


Figure 23 Path 1-2 pour l'évolution de la contrainte avec la profondeur



Graphique 10 Evolution de la contrainte longitudinale avec la profondeur

L'existence des contraintes en traction autour des contraintes en compression a été aussi observé par (Dai et Shaw 2004). Ces derniers auteurs ont réalisé une étude sur la fusion laser de nickel et de porcelaine dentale. De plus, les thèses de (Roberts 2012; Van Belle 2013) trouvent également les mêmes résultats, en corrélation avec la réalité.

IV.3.4. Contrainte hydrostatique

La contrainte hydrostatique permet de définir l'état de contrainte dans la pièce. Ainsi, elle informe sur les zones qui ont tendance à se contracter ou se dilater pour s'équilibrer en raison d'un chargement en traction pour les zones contractées ou, inversement, en compression pour les zones dilatées.

Une contrainte hydrostatique positive réduit la durée de vie en fatigue de la pièce car elle augmente la taille des porosités présentes dans la pièce et donc le risque de fissuration.

La formule suivante donne le calcul de la contrainte hydrostatique à partir des contraintes principales σ_I , σ_{II} et σ_{III} .

$$\sigma_H = -\frac{1}{3}(\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III})$$

La Figure 24 permet d'observer que la contrainte hydrostatique est en traction au niveau de l'interface entre la pièce et le support. Cette zone possède donc un risque d'apparition de fissures. Ce résultat a été comparé avec (Van Belle 2013) qui a déterminé que la zone critique se situe juste en-dessous de l'interface. De plus, une discussion avec les experts d'Altran a permis de valider ces résultats.

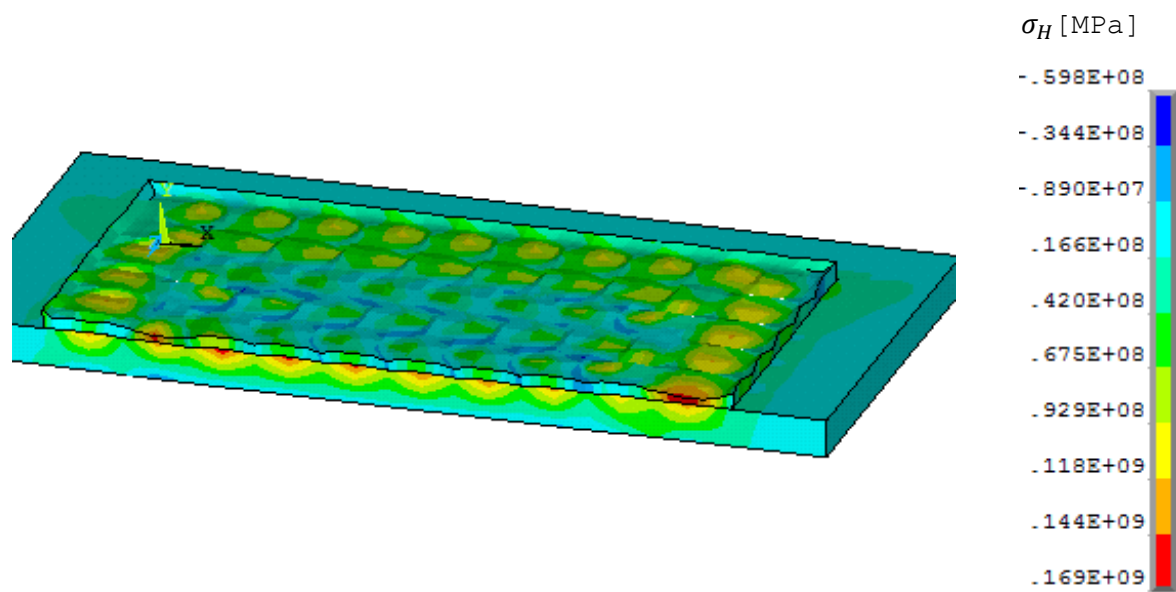


Figure 24 Champ de la contrainte hydrostatique

CHAPITRE V Etude paramétrique du procédé SLM

Ce dernier Chapitre présente les deux études paramétriques faisant évoluer les paramètres machine afin de trouver l'optimum qui minimise le champ de contraintes lors de la fabrication.

Sachant que le procédé SLM a plus de 300 variables qui influencent le résultat final, trois variables différentes ont été choisies à partir de précédentes études réalisées par Altran et, aussi, à partir de l'opinion des experts qui travaillent sur la partie expérimentale de la fabrication SLM. Ces trois paramètres sont la température de préchauffage de la plaque support, la première analyse se focalise sur l'évolution de ce paramètre, ainsi que le couple puissance-vitesse du laser, la deuxième étude présente une analyse de sensibilité liée à ce couple.

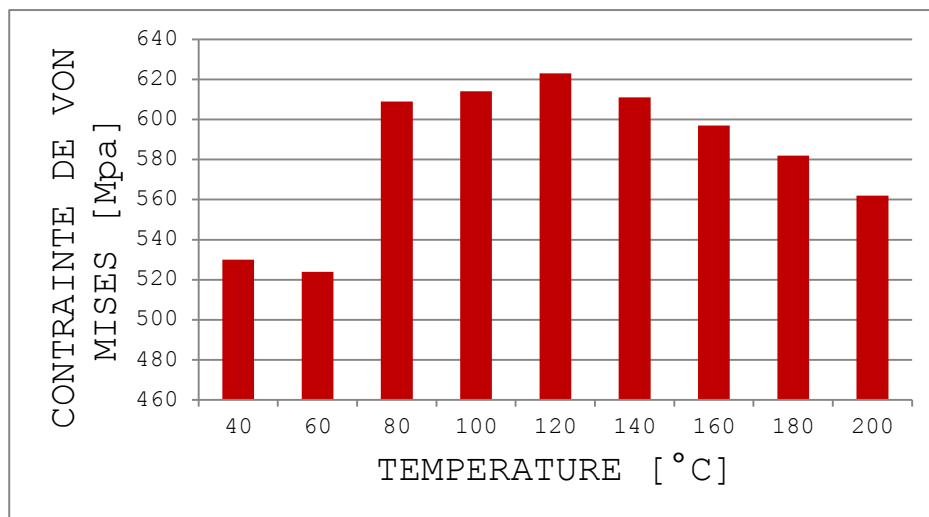
Il faut juste annoncer que cette analyse a été réalisée avant d'ajouter une modification mineure dans le code. Ceci provoque l'obtention de résultats un peu sous-estimés, même si la tendance finale est la même et, donc, le choix des optimaux non impacté.

V.1. Préchauffage de la plaque support en acier

L'objectif de cette première étude paramétrique est de déterminer l'influence du préchauffage de la plaque support sur le champ de contraintes résiduelles de la pièce finale. Dans ce but, un plan d'expérience simple qui englobe l'intervalle de températures [40°C ; 200°C] a été réalisé. Cet intervalle a été défini à l'aide des consultants d'Altran qui travaillent sur la partie pratique de l'ALM en prenant en compte les limites des machines existantes et les températures les plus utilisées par les fabricants.

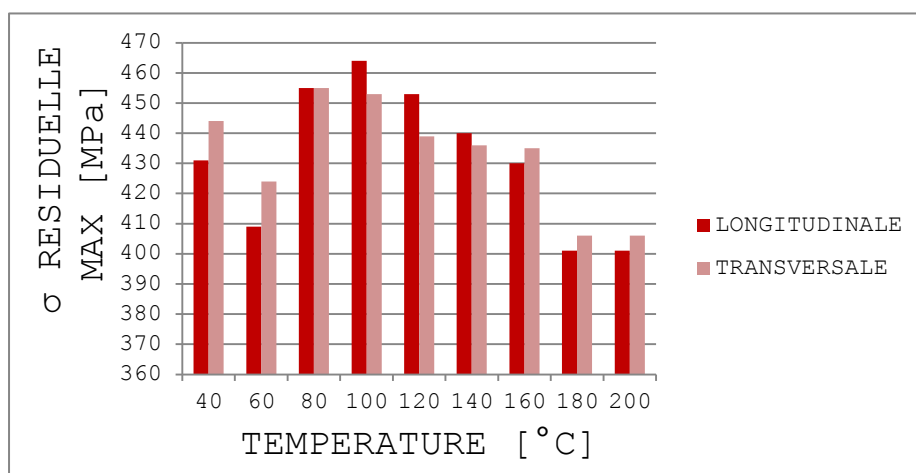
Cet intervalle a été divisé en 9 analyses différentes, soit de 40°C à 200 °C en prenant des intervalles de 20°C.

Le Graphique 11 présente la contrainte résiduelle de Von Mises obtenue après le refroidissement naturel. Il est possible d'y observer que les valeurs de préchauffage permettant de diminuer la contrainte maximale sont les températures des deux extrémités de l'intervalle, soit 40°C ou 60°C et 200°C. La valeur minimale est celle où la plaque a été préchauffée à 60°C, avec 524 MPa. Cependant, les valeurs de 40°C et 200 °C convergent vers des résultats proches, avec des contraintes maximales respectives de 530 MPa et 560 MPa.



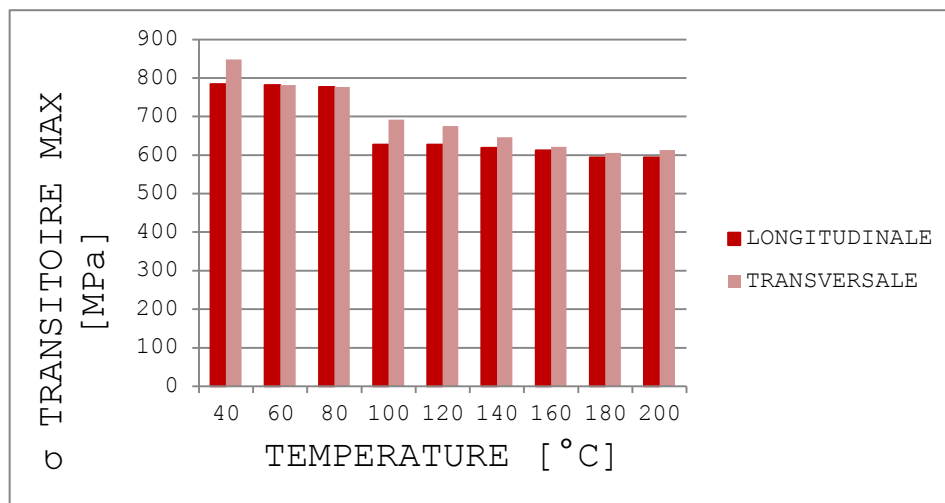
Graphique 11 Contrainte résiduelle de Von Mises pour l'étude paramétrique 1

Les valeurs affichées ne sont pas suffisantes pour déterminer la température optimale de préchauffage. En effet, nous obtenons trois optimums très proches (autour de 55% de la limite élastique du matériau). Pour cela, deux autres études ont été effectuées afin de connaître les contraintes maximales longitudinales et transversales résiduelles et transitoires. Le Graphique 12 présente le champ de contraintes résiduelles, où la température optimale pour minimiser ce champ est, globalement, 200°C, avec des valeurs maximales de 401 MPa pour σ_L et 406 MPa pour σ_T . Le champ de contraintes hors plan n'a pas été comparé étant donné que ses valeurs sont 10 fois plus petites que celles des contraintes longitudinales et transversales.



Graphique 12 Contrainte résiduelle maximale à traction pour l'étude paramétrique 1

Finalement, pour connaître la contrainte maximale lors du procédé, le Graphique 13 a été créé pour étudier les contraintes transitoires longitudinale et transversale maximales. Ce graphique permet de voir que les valeurs maximales, pour la température de 200°C, sont autour de 600 MPa, soit entre 55% et 60% de la limite élastique.



Graphique 13 Contrainte transitoire maximale à traction pour l'étude paramétrique 1

En conclusion, à partir de ces trois graphiques, nous pouvons définir le préchauffage de 200°C comme l'optimum permettant de réduire le champ de contraintes produit par le choc thermique lors de la fabrication d'une pièce par SLM.

V.2. Variation de la puissance et de la vitesse laser

Une fois la température optimale de la plaque support définie, la deuxième étude paramétrique réalisée concerne les caractéristiques du laser. Pour cela, la puissance [W] et la vitesse du laser [mm/s] ont été prises comme variables de l'étude.

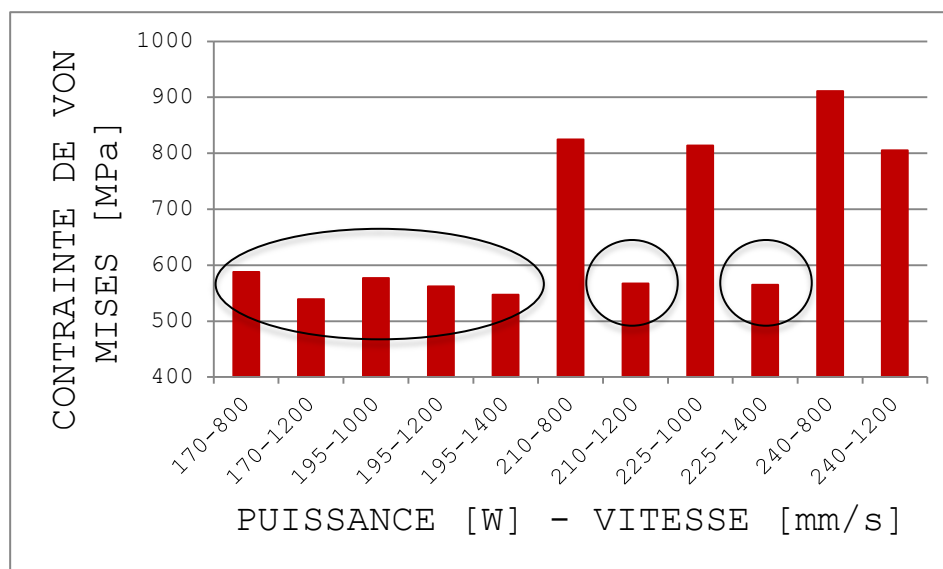
Les intervalles d'étude pour ces deux variables sont respectivement [170 W-240 W] et [800 mm/s-1400 mm/s] pour la puissance et la vitesse du laser. Dans ces intervalles 10 couples de valeurs sont utilisés pour réaliser les calculs. Ainsi, dans le Tableau 2 il y a, en jaune, les couples puissance-vitesse à simuler et, en bleu, le couple puissance-vitesse avec lequel toutes les études ont jusqu'à présent été réalisées.

	Vitesse du laser [mm/s]			
	800	1000	1200	1400
Puissance du laser [W]	170			
	195			
	210			
	225			
	240			

Tableau 2 Plan d'expérience Puissance-Vitesse

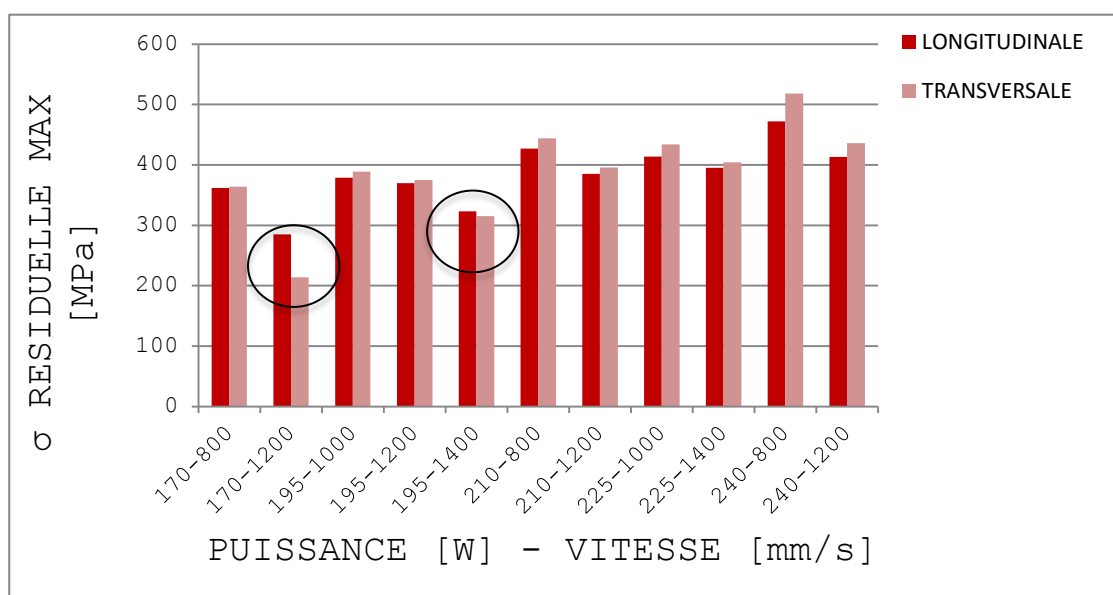
Comme précédemment, l'objectif est de définir l'optimum puissance/vitesse à partir des calculs sur le champ de contraintes de la pièce. Pour cela, la contrainte de Von Mises, les contraintes longitudinales et transversales résiduelles et les contraintes transitoires sont étudiées.

Le Graphique 14 présente la première étude, soit la contrainte de Von Mises pour tous les couples puissance-vitesse. Il est possible d'observer une tendance générale de minimisation de la contrainte (<600 MPa) pour les couples marqués sur le Graphique 14.



Graphique 14 Contrainte résiduelle de Von Mises pour l'étude paramétrique 2

Suite à cette première étude, les contraintes résiduelles maximales en traction (longitudinales et transversales) sont déterminées et affichées dans le Graphique 15.

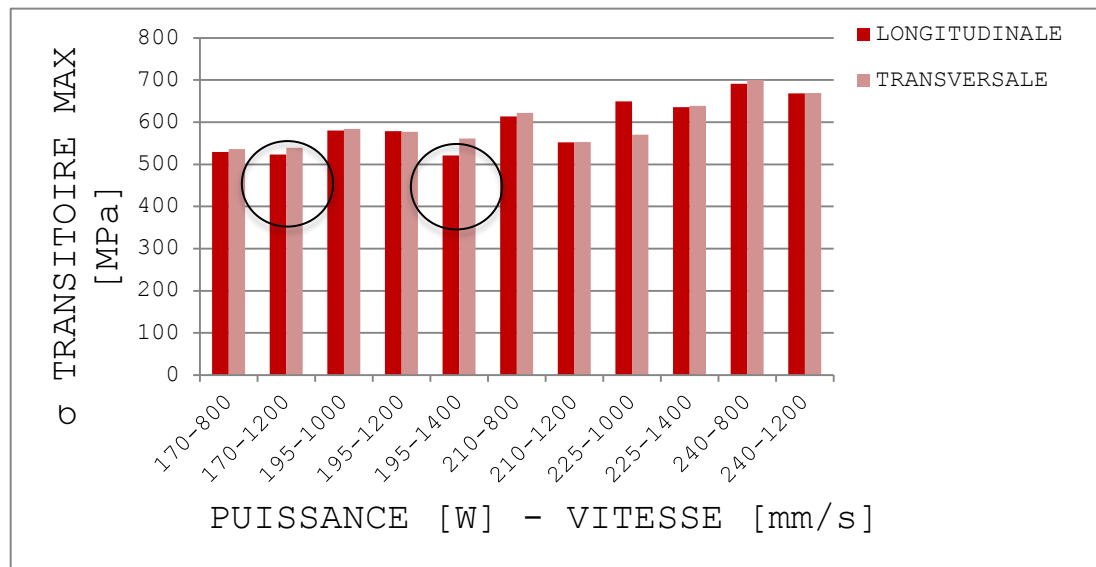


Graphique 15 Contrainte résiduelle maximale à traction pour l'étude paramétrique 2

En se focalisant sur les choix faits à partir du calcul de la contrainte de Von Mises, deux couples puissance-vitesse ne dépassent pas les 350 MPa. Ainsi, les couples 170-1200 et 195-1400 sont potentiellement des réglages optimaux permettant de minimiser les contraintes. .

La troisième étude pour déterminer l'optimum est le calcul de la contrainte transitoire, affichée dans le Graphique 16.

Les conclusions suite à cette étude sont les mêmes que pour l'étude précédente. En effet, les deux couples déjà sélectionnés se trouvent être également les optimums de cette dernière étude, avec des valeurs maximales autour de 500 MPa.



Graphique 16 Contrainte transitoire maximale à traction pour l'étude paramétrique 2

Ces trois études ont permis de sélectionner 2 couples optimaux parmi les 11 possibilités, soit :

$$P = 170 \text{ W et } v = 1200 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$P = 195 \text{ W et } v = 1400 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

En conséquence, d'autres critères doivent être considérés afin de choisir l'optimum.

Le premier critère choisi a été la possible diminution de l'énergie apportée par le laser, pour réduire sa consommation et, par conséquent, le coût de fabrication. Pour cela, l'énergie du laser pour les deux couples est calculée à partir de la formule suivante. Elle dépend de la puissance, de la vitesse et du diamètre du laser qui est constant et égal à 100 μm :

$$E^{\text{laser}} = \frac{P}{v * d_{\text{laser}}} \text{ J/mm}^2$$

Le deuxième critère sélectionné a été la diminution de la température maximale du matériau, en vérifiant toujours qu'elle soit dans les limites de l'intervalle $[T_{\text{fusion}} ; T_{\text{vaporisation}}]$. Le fait de

minimiser la température maximale permet de réduire le choc thermique sur la pièce et, donc, de relaxer le champ de contraintes.

A partir de ces deux derniers critères, il est possible d'observer que la diminution d'énergie et de température se fait pour le couple $P=195\text{ W}$ et $v=1400\text{ J/mm}^2$ qui est, donc, l'optimum.

	Couple Puissance - Vitesse		
Critère		170 W- 1200 mm/s	195 W- 1400mm/s
	Energie consommée	2.21 J/mm^2	1.39 J/mm^2
	Température maximale	2423 °C	2095 °C

Tableau 3 Résultats critères supplémentaires

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le procédé SLM présente de nombreux avantages présentés dans ce rapport, mais aussi quelques inconvénients, comme l'apparition de contraintes résiduelles qui nuisent à la robustesse mécanique des systèmes ainsi conçus. Il est donc nécessaire de maîtriser les phénomènes physiques intervenant lors du procédé de fabrication afin d'améliorer la qualité des pièces conçues.

L'objectif de ces travaux était d'analyser, modéliser et simuler le procédé de fabrication SLM afin de prédire l'apparition des contraintes résiduelles. Une étude préliminaire a permis de faire un état des lieux des modèles numériques existants et prédire les avantages et les limites, ainsi que les nombreux paramètres (notamment liés à la machine) influençant les valeurs des contraintes résiduelles. Cela a conduit à développer un modèle thermomécanique 3D dont la taille des éléments est équivalente à celle des particules de poudre. Celui-ci prédit, tout d'abord, les champs de températures, puis, les contraintes résiduelles induites au cours du procédé SLM.

Le modèle prend en compte des paramètres liés au procédé de fabrication tels que la source laser mobile, les propriétés du matériau dépendantes de la température, les changements d'état et de volume du matériau. L'utilisation de la technique d'activation et de désactivation des éléments, *Element Birth and Death*, a permis de simuler l'ajout des couches de poudre induite par le procédé SLM et la fusion et solidification de la matière suite au parcours du laser.

Concernant l'étude thermique, les principaux résultats fournis par le modèle numérique sont les suivants :

- La température maximale au cours de la création d'une couche est supérieure à la température de fusion du TA6V et inférieure à celle de vaporisation. Ce résultat permet de vérifier la fusion totale de la poudre sans engendrer l'évaporation des particules.
- L'augmentation de la température globale de la pièce au début du traitement de chaque couche est significative. Ce fait permet de valider la bonne conduction entre le lit de poudre et le support, ainsi qu'entre la couche précédemment créée et la nouvelle pellicule de poudre déposée. Ce phénomène est très important afin d'éviter des possibles mouvements de la pièce qui pourraient créer des défauts de forme importants.
- La conduction dans le plan de fabrication comporte des petits chocs thermiques (de l'ordre de 300°C) dans les zones situées autour du pointage laser. Cela permet de définir, à chaque pointage laser, la zone affectée thermiquement.

Cependant, le modèle numérique ainsi développé a aussi des limites:

- Le modèle thermique permet de modéliser le changement d'état de la matière et prend en compte la variation de densité entre la poudre, le liquide et le solide. Cependant, cette variation de densité est actuellement modélisée comme une diminution de la hauteur de la couche, alors que la variation impacte le volume global.
- La modélisation discrète du mouvement du laser est aussi une limite de l'étude. En réalisant un mouvement discret, le bilan thermique doit se faire à chaque pointage du laser, engendrant des pertes de chaleur n'ont prises en compte par le modèle actuel.

- Les propriétés thermiques de la poudre sont obtenues de manière très approximée. Ainsi, la variation de ces propriétés peut engendrer des erreurs lors du calcul thermique impactant la température globale de quelques degrés.
- Le bain de fusion n'est pas pris en compte, et donc son influence sur la température et l'état de la matière à chaque instant est négligé.

L'étude thermomécanique, permet d'obtenir les résultats suivants :

- Le comportement élastoviscoplastique est essentiel afin de bien modéliser le procédé. Ainsi, sans la prise en compte de ce phénomène physique, les résultats obtenus sont inversés et ne convergent pas vers les résultats expérimentaux.
- Le comportement des contraintes est réaliste : obtention de contraintes en compression lors du chauffage et de contraintes en traction lors du refroidissement.
- Les valeurs maximales des contraintes résiduelles sont du même ordre de grandeur que celles obtenues expérimentalement par (Van Belle 2013). Les travaux de simulation menés par Van Belle convergent vers des contraintes résiduelles dont les valeurs sont supérieures à celles obtenues expérimentalement. Cela pourrait s'expliquer par le fait que sa modélisation est basée sur un matériau de comportement élastoplastique parfait, moins fidèle à la réalité que le comportement élastoviscoplastique.

Comme pour l'étude thermique, la modélisation thermomécanique présente aussi des limites :

- L'échelle macroscopique de l'étude fait que les seules contraintes étudiées soient les contraintes macro-résiduelles. Ainsi, les contraintes micro-résiduelles ne sont pas considérées dans ce projet. Or, elles pourraient avoir une influence sur le comportement final de la pièce.
- L'influence du choix des paramètres de la loi de viscoplasticité n'a pas été étudiée. Ainsi, il serait pertinent de réaliser des études expérimentales afin de trouver les propriétés les plus précises possibles.
- La discrétisation du parcours laser peut engendrer des concentrations de contraintes au centre de chaque pointage dues au choc thermique surestimé. L'utilisation, par exemple, d'ABAQUS pour modéliser un parcours continu permettrait de pallier ce problème.

Enfin, le modèle numérique a été réalisé afin de mener une étude paramétrique pour déterminer l'impact de trois paramètres du procédé de fabrication sur les contraintes résiduelles. Ces paramètres sont la température initiale de la plaque support, la puissance du laser et sa vitesse. Concernant ces études, nous observons que :

- Le préchauffage de la plaque support est le paramètre le plus influençant. Ainsi, avec une plaque préchauffée, le choc thermique induit par le faisceau laser sur le lit de poudre est réduit. Les contraintes résiduelles, les contraintes transitoires et la contrainte de Von Mises sont donc minimisées. En effet, en chauffant le support à 200 °C, les contraintes résiduelles maximales sont diminuées de près de 12% en comparaison à un support chauffé à 100°C.
- Le couple puissance-vitesse laser a aussi une influence importante sur le résultat final. Même si l'énergie apportée peut rester pratiquement constante, il faut éviter les couples avec des valeurs extrêmes (puissances et vitesses trop élevées ou trop basses). L'optimum est donc obtenu pour des puissances autour de 170-200W et des vitesses entre 1200 et 1400 mm/s.

L'amélioration de ces limites fait partie des perspectives du projet, en effet les approximations existantes doivent être supprimées au fur et à mesure que le projet avance, afin d'obtenir des résultats plus précis. Ainsi, les perspectives concernant l'étude thermique devront suivre les axes suivants :

- La diminution de l'échelle d'étude afin d'obtenir une transformation d'état de la matière plus précise. Si la taille des éléments diminue (fixée à 25 μm dans notre étude), la fusion et la solidification d'une particule de poudre sera beaucoup plus réaliste.
- La modélisation d'une source laser continue pour éviter des pertes énergétiques entre les pointages existants. Pour cela, l'utilisation de logiciels comme ABAQUS, par exemple, serait intéressant pour arriver à modéliser des géométries complexes avec parcours laser continu.
- L'étude des phases allotropiques existantes dans la microstructure de la pièce. A échelle microscopique, ces études seront très importantes afin de déterminer les contraintes. Ceci pourra se réaliser suite à l'étude des vitesses d'échauffement et de refroidissement à l'aide, par exemple, de logiciels comme ThermoCalc®. Ainsi, les résultats thermiques pourraient être reliés aux phases allotropiques existantes.
- La possible utilisation d'un maillage mobile pour s'adapter au phénomène de *shrinkage*. Avec le maillage mobile, la contraction et la dilatation des éléments seraient possibles à modéliser et permettraient l'obtention de résultats plus précis.

Les perspectives concernant l'étude mécanique sont les suivantes :

- La diminution de l'échelle d'étude afin de déterminer les contraintes micro-résiduelles. Ces contraintes sont encore divisées en deux sous-catégories (inter-granulaire et atomique). Ainsi, des études à ces deux dernières échelles seront nécessaires afin d'atteindre une modélisation adaptée à la réalité.
- L'analyse des champs de déformations et de déplacements. Pour des pièces complexes avec des applications spécifiques, il faudra déterminer les déformations élastiques et plastiques ainsi que les déplacements maximaux d'une pièce soumise à des efforts concrets.

A plus long terme, les perspectives devront suivre les axes suivants :

- Une fois contrôlé le champ de contraintes micro-résiduelles, la suite serait de simuler les possibles défauts internes de la pièce (porosités, dislocations...). Suite à cette modélisation, il faudra étudier le comportement d'une pièce présentant un de ces défauts et trouver les possibles actions correctives afin de le compenser.
- Il existe plus de 300 paramètres machine ayant un impact sur le procédé de fabrication. Ainsi, nos prochaines études paramétriques devront également déterminer les paramètres ayant l'influence la plus importante. Ces travaux seront réalisés en se basant sur des études expérimentales existantes ou des modélisations déjà réalisées.

En conclusion, les travaux présentés soulignent le potentiel de la modélisation numérique du procédé SLM. La validation des résultats permet de démontrer la pertinence de l'étude et de mettre en avant les perspectives à venir. L'étude paramétrique permet d'améliorer la sélection des paramètres de fabrication, mais aussi d'éliminer les difficultés liées au post-traitement de la pièce (traitements thermiques complexes, traitements surfaciques). Enfin, ce projet permet aux utilisateurs

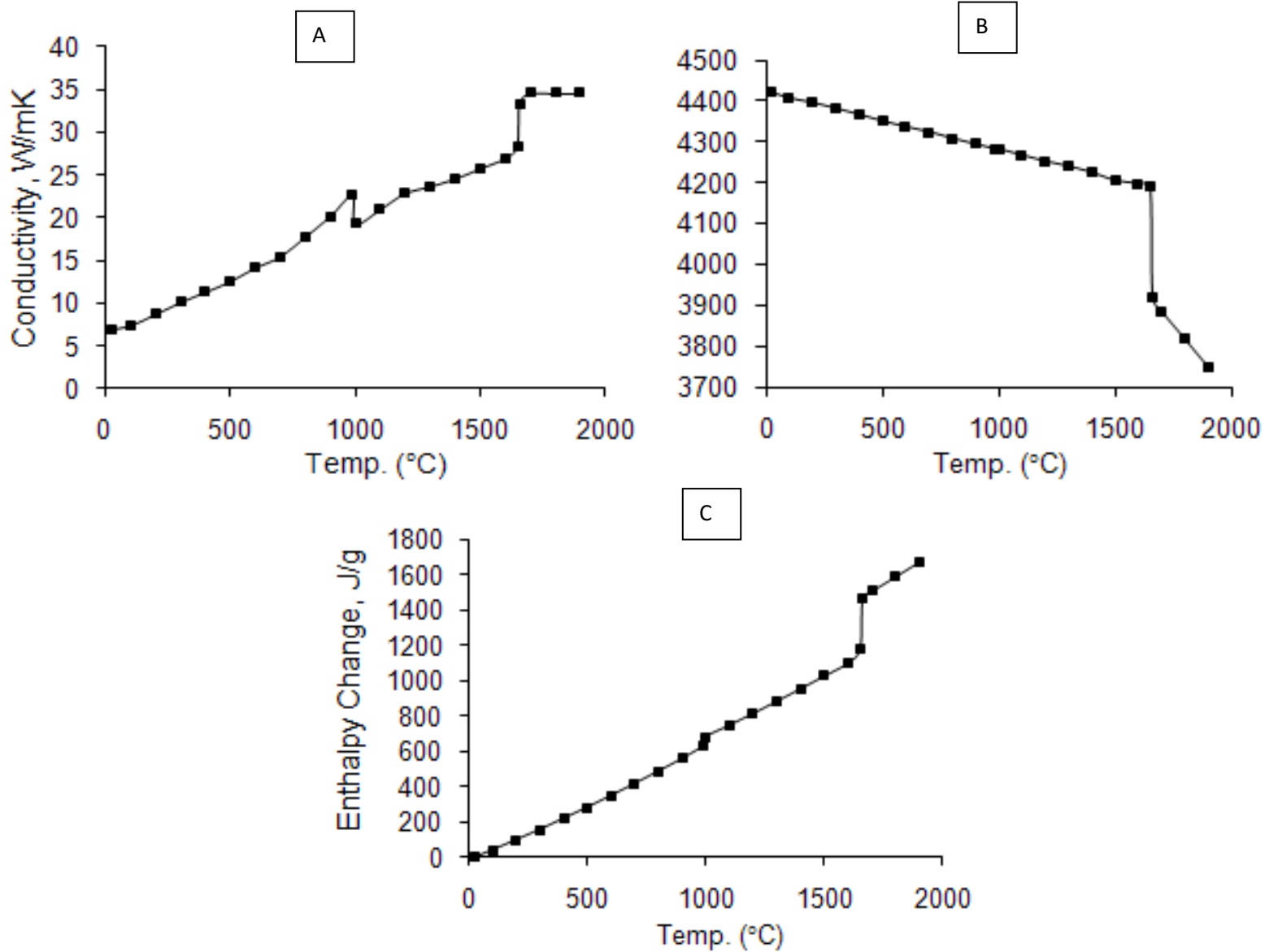
d'améliorer leurs connaissances du procédé SLM, et de faciliter l'implémentation de modélisations pour des procédés similaires.

BIBLIOGRAPHIE

- Beaman, Joseph J., Joel W. Barlow, David L. Bourell, Richard H. Crawford, Harris L. Marcus, et Kevin P. McAlea. 1997. « Solid freeform fabrication: a new direction in manufacturing ». *Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA* 2061: 25–49.
- Dai, K, et L Shaw. 2004. « Thermal and Mechanical Finite Element Modeling of Laser Forming from Metal and Ceramic Powders ». *Acta Materialia* 52 (1): 69-80. doi:10.1016/j.actamat.2003.08.028.
- Dong, P., J. K. Hong, et P. J. Bouchard. 2005. « Analysis of residual stresses at weld repairs ». *International journal of pressure vessels and piping* 82 (4): 258–269.
- Matsumoto, M., M. Shiomi, K. Osakada, et F. Abe. 2002. « Finite Element Analysis of Single Layer Forming on Metallic Powder Bed in Rapid Prototyping by Selective Laser Processing ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42 (1): 61-67. doi:10.1016/S0890-6955(01)00093-1.
- Papadakis L. et al. 2012. « Numerical Modeling of Heat Effects during Thermal Manufacturing of Aero Engine Components. Proceedings of the World Congress on Engineering, vol. 3, July 4 – 6, London, UK, 2012, 6 p. »
- Patat L. 2010. « Modélisation de la fusion laser de poudres métalliques. Master de Recherche – Génie Mécanique. Villeurbanne : INSA de Lyon, 2010, 84 p. »
- Roberts, Ibiye Aseibichin. 2012. « Investigation of residual stresses in the laser melting of metal powders in additive layer manufacturing ». <http://wlv.openrepository.com/wlv/handle/2436/254913>.
- Romano, John, Leila Ladani, et Magda Sadowski. 2015. « Thermal Modeling of Laser Based Additive Manufacturing Processes within Common Materials ». *Procedia Manufacturing* 1: 238-50. doi:10.1016/j.promfg.2015.09.012.
- Schneider, M.F. 1998. « Laser Cladding with Powder: Effect of some machining parameters on clad properties. University of Twente, Enschede, Ph.D ».
- Shi, Yongjun, Hong Shen, Zhenqiang Yao, et Jun Hu. 2007. « Temperature Gradient Mechanism in Laser Forming of Thin Plates ». *Optics & Laser Technology* 39 (4): 858-63. doi:10.1016/j.optlastec.2005.12.006.
- Shiomi, M., A. Yoshidome, F. Abe, et K. Osakada. 1999. « Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of metallic powders ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 39 (2): 237–252.
- Steen, William M. 2003. *Laser Material Processing*. London: Springer London. doi:10.1007/978-1-4471-3752-8.
- Totten, George E. 2002. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM international. https://books.google.fr/books?hl=es&lr=&id=_a9UEHk4cOwC&oi=fnd&pg=PR6&dq=Handbook+of+residual+stressand+deformation+of+steel&ots=mhdhtutv6r&sig=zpRUbVtWQAuvJxrCk2uCOjrsmE.
- Van Belle, Laurent. 2013. « Analyse, modélisation et simulation de l'apparition de contraintes en fusion laser métallique ». Lyon, INSA. <http://www.theses.fr/2013ISAL0116>.
- Zeng, K., D. Pal, H. J. Gong, N. Patil, et B. Stucker. 2015. « Comparison of 3DSIM thermal modelling of selective laser melting using new dynamic meshing method to ANSYS ». *Materials Science and Technology* 31 (8): 945–956.

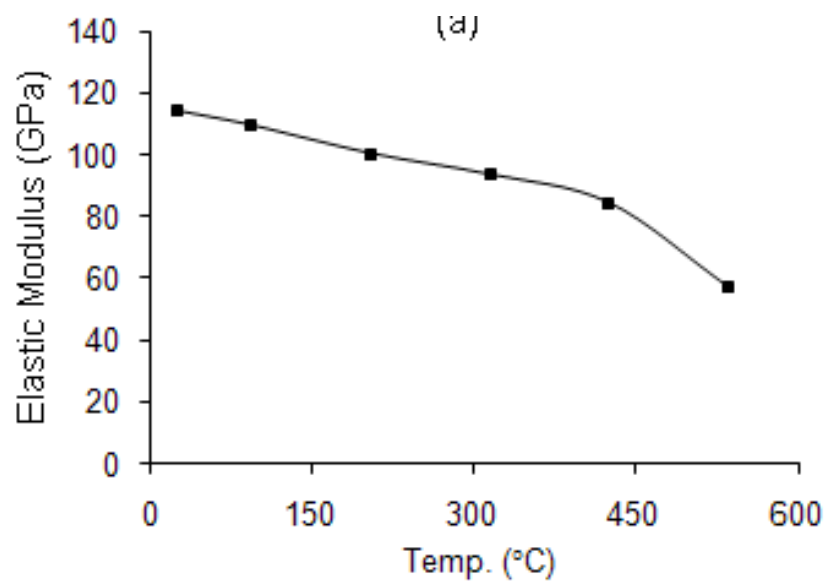
ANNEXES

A.1. Propriétés thermiques des matériaux

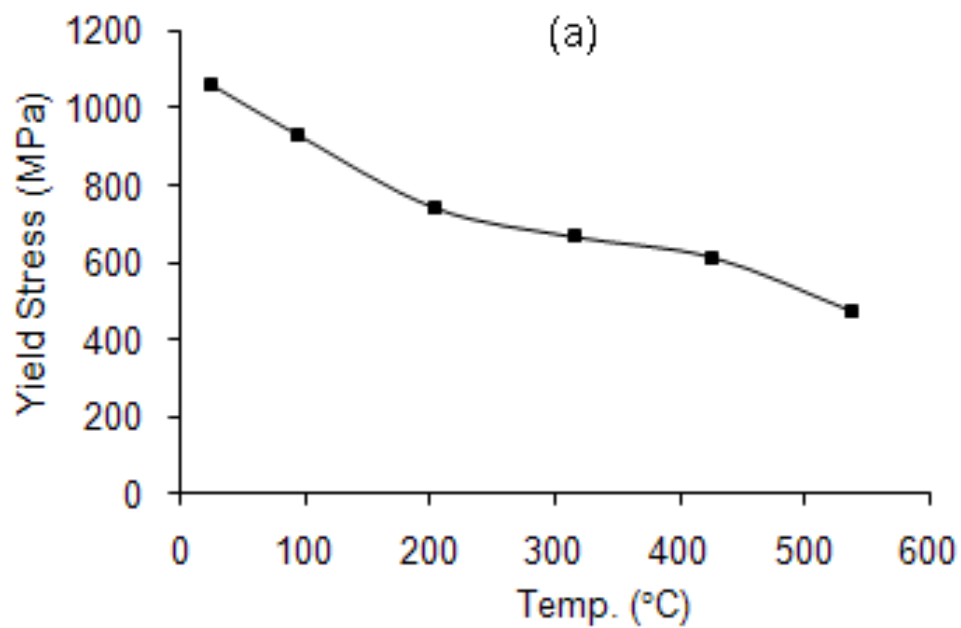


Graphique 17 [A] Conductivité thermique, [B] Densité, [C] Enthalpie du TA6V

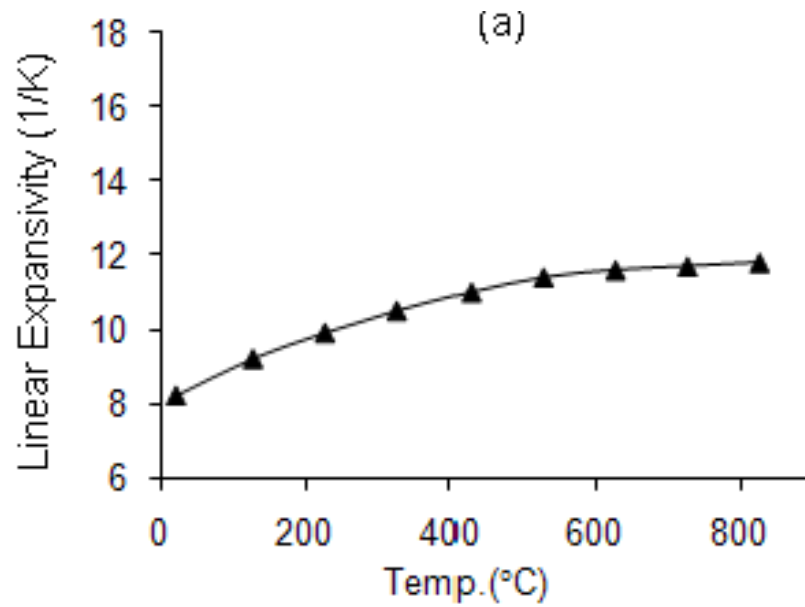
A.2. Propriétés mécaniques des matériaux



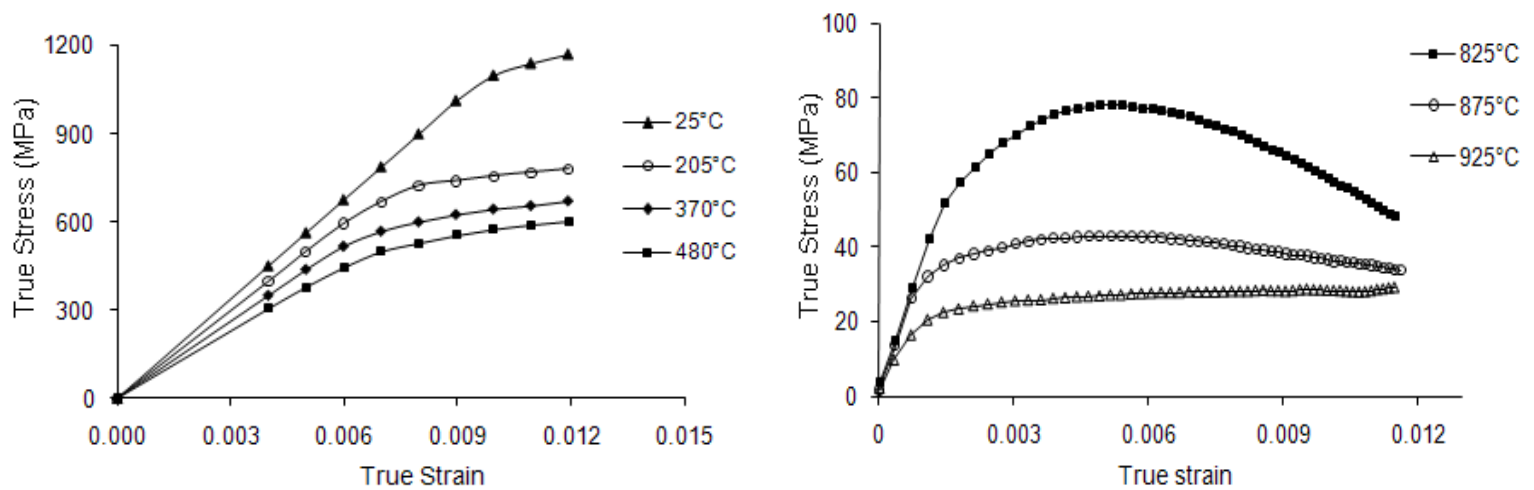
Graphique 18 Module de Young du TA6V



Graphique 19 Limite élastique du TA6V



Graphique 20 Dilatation du TA6V

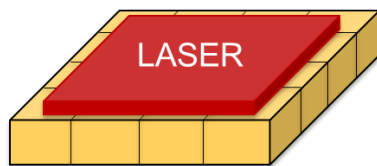
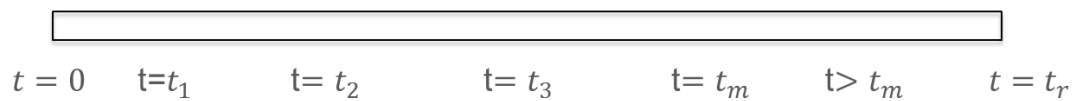


Graphique 21 True Stress-True Strain TA6V

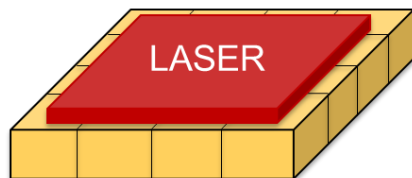
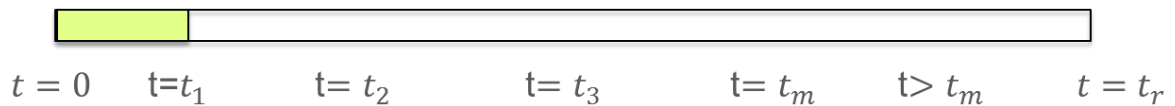
A.3. Changement d'état des éléments

Paramètre	Définition
t_m	Temps d'application du flux laser sur la surface d'un Hatch
t_1	$t_m/8$
t_2	$t_m/3$
t_3	$2*t_m/3$
t_r	Refroidissement. Application du flux laser au Hatch i+1

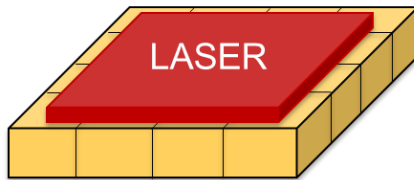
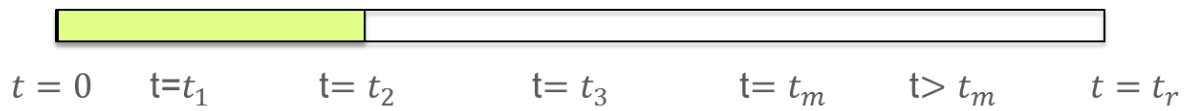
Tableau 4 Différents instants de l'analyse



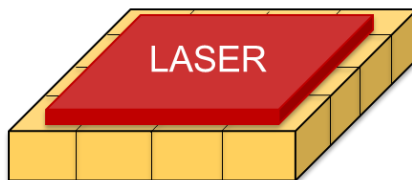
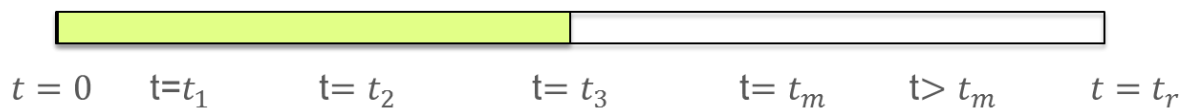
- Région poudre
- 70% du flux laser réfléchi



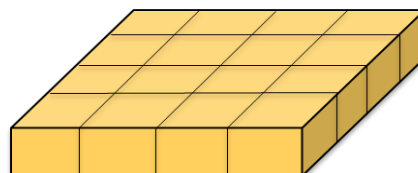
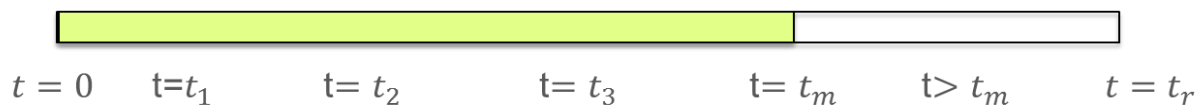
- Région liquide
- 90% du flux laser réfléchi



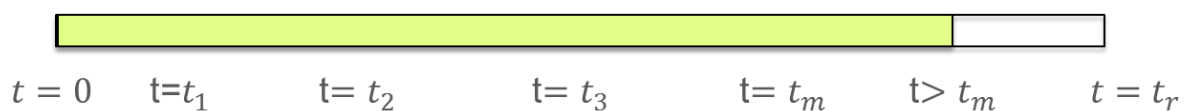
- Région liquide
- 90% du flux laser réfléchi



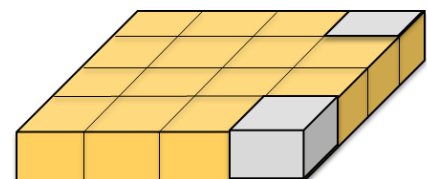
- Région liquide
- 90% du flux laser réfléchi



- Fin d'application du laser
- Région liquide
- 90% du flux laser réfléchi



- Solidification partielle
- Éléments liquides et solides



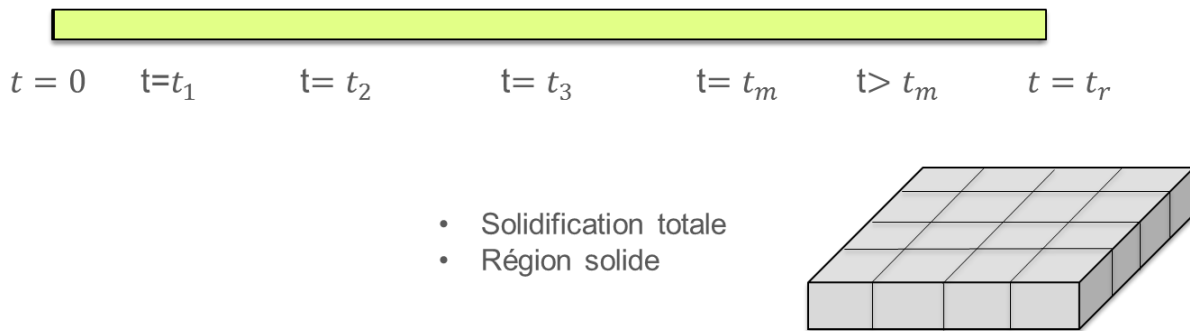


Figure 25 Changement d'état du matériau

A.4. Shrinkage

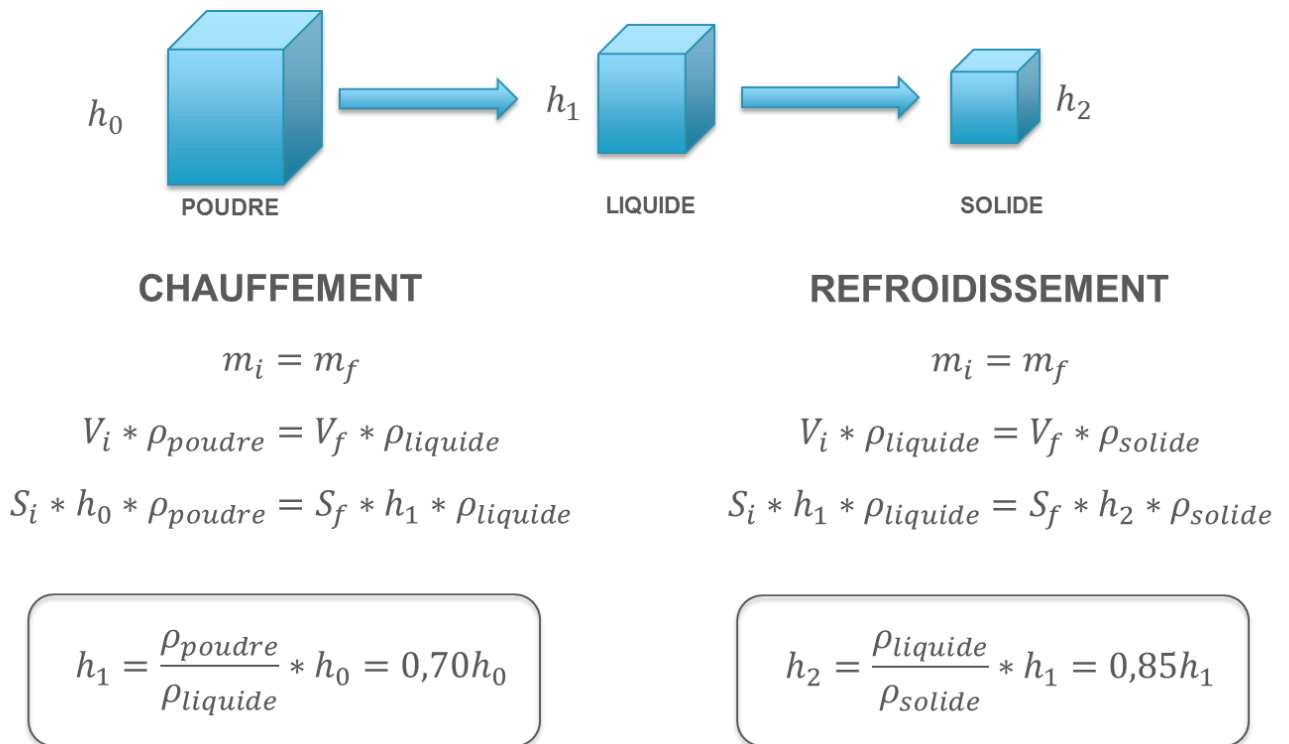


Figure 26 Shrinkage et calcul de conservation de masse